

29. 3. 2004

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日            2 0 0 3 年   4 月 1 7 日  
Date of Application:

出 願 番 号            特 願 2 0 0 3 - 1 1 3 0 6 0  
Application Number:  
[ST. 10/C]:            [ J P 2 0 0 3 - 1 1 3 0 6 0 ]

出      願      人            本 田 技 研 工 業 株 式 有 限 公 司  
Applicant(s):

REC'D 21 MAY 2004

WIPO

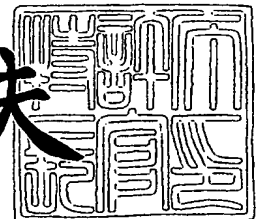
PCT

**PRIORITY DOCUMENT**  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

2 0 0 4 年   4 月 3 0 日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

今 井 康 夫



【書類名】 特許願

【整理番号】 PSK66201HW

【提出日】 平成15年 4月17日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G06F  
G01L 1/26

【発明者】

【住所又は居所】 埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会社本田技術研  
究所内

【氏名】 河合 雅和

【特許出願人】

【識別番号】 000005326

【氏名又は名称】 本田技研工業株式会社

【代理人】

【識別番号】 100077805

【弁理士】

【氏名又は名称】 佐藤 辰彦

【選任した代理人】

【識別番号】 100077665

【弁理士】

【氏名又は名称】 千葉 剛宏

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 015174

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9711295

【プルーフの要否】 要

**【書類名】 明細書****【発明の名称】**

二足歩行移動体の床反力作用点推定方法及び二足歩行移動体の関節モーメント推定方法

**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

二足歩行移動体の各脚体毎の床反力作用点の位置を逐次推定する方法であって、

前記二足歩行移動体の各脚体の足平部の底面のうち、該脚体の足首関節の直下箇所と該脚体の足平部の中足趾節関節の直下箇所とにそれぞれ当該直下箇所の接地の有無に応じた接地検知信号を出力する第 1 接地センサおよび第 2 接地センサを設けておき、

前記二足歩行移動体の運動中に、該二足歩行移動体の重心の位置と各脚体の足首関節の位置と該脚体の足平部の中足趾節関節の位置とをそれぞれ逐次把握すると共に、接地している各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離を逐次把握する第 1 ステップと、

前記二足歩行移動体の運動中に接地している各脚体毎に、少なくとも各脚体の前記第 1 接地センサの接地検知信号による接地の有無と前記第 2 接地センサの接地検知信号による接地の有無との組合わせに応じて、第 1 ステップで位置を求めた前記重心、該脚体の足首関節および該脚体の中足趾節関節のうちのいずれか一つの水平方向位置を選択的に該脚体の床反力作用点の水平方向位置として逐次推定すると共に、該脚体の床反力作用点の鉛直方向位置を、前記第 1 ステップで求めた該脚体の足首関節から接地面までの前記鉛直方向距離だけ該足首関節から鉛直方向下方に離れた位置として逐次推定する第 2 ステップとを備えたことを特徴とする二足歩行移動体の床反力作用点推定方法。

**【請求項 2】**

前記第 2 ステップで前記床反力作用点の水平方向位置を推定するとき、接地している各脚体毎に、各脚体の第 1 接地センサの接地検知信号が接地有りを示す信号であり、且つ該脚体の第 2 接地センサの接地検知信号が接地無しを示す信号で

あるときには、該脚体の足首関節の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定し、各脚体の第 1 接地センサの接地検知信号が接地無しを示す信号であり、且つ該脚体の第 2 接地センサの接地検知信号が接地有りを示す信号であるときには、該脚体の中足趾節関節の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定し、各脚体の第 1 接地センサ及び第 2 接地センサの両者の接地検知信号が接地有りを示す信号であり、且つ、前記重心の位置が該脚体の足首関節の位置よりも前記二足歩行移動体の進行方向で後側に存在するときには、該脚体の足首関節の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定し、各脚体の第 1 接地センサ及び第 2 接地センサの両者の接地検知信号が接地有りを示す信号であり、且つ、前記重心の位置が該脚体の中足趾節関節の位置よりも前記二足歩行移動体の進行方向で前側に存在するときには、該脚体の中足趾節関節の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定し、各脚体の第 1 接地センサ及び第 2 接地センサの両者の接地検知信号が接地有りを示す信号であり、且つ、前記重心の位置が前記二足移動体の進行方向で該脚体の足首関節の位置と中足趾節関節の位置との間に存在するときには、前記重心の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定することを特徴とする請求項 1 記載の二足歩行移動体の床反力作用点推定方法。

### 【請求項 3】

前記二足歩行移動体の直立停止状態における各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離をあらかじめ計測して記憶保持しておき、前記第 1 ステップで前記接地している各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離を把握するとき、前記記憶保持した鉛直方向距離を、前記接地している各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離として把握することを特徴とする請求項 1 又は 2 記載の二足歩行移動体の床反力作用点推定方法。

### 【請求項 4】

前記二足歩行移動体の直立停止状態における各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離と該脚体の中足趾節関節から接地面までの鉛直方向距離とをそれぞれ第 1 基本鉛直方向距離及び第 2 基本鉛直方向距離としてあらかじめ計測して記憶保持しておき、

前記第 1 ステップで前記接地している各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離を把握するとき、前記重心の位置が該脚体の中足趾節関節の位置よりも二足歩行移動体の進行方向で後側に存在するときには、前記第 1 基本鉛直方向距離を該脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離として把握し、前記重心の位置が該脚体の中足趾節関節の位置よりも二足歩行移動体の進行方向で前側に存在するときには、該脚体の足首関節と中足趾節関節との間の鉛直方向距離を求めた後、その求めた鉛直方向距離に前記第 2 基本鉛直方向距離を加えた値を該脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離として把握することを特徴とする請求項 1 又は 2 記載の二足歩行移動体の床反力作用点推定方法。

#### 【請求項 5】

請求項 1 ～ 4 のいずれか 1 項に記載の二足歩行移動体の床反力作用点推定方法により逐次求めた床反力作用点の位置の推定値を用いて前記二足歩行移動体の各脚体の少なくとも一つの関節に作用するモーメントを推定する方法であって、

前記二足歩行移動体の接地している各脚体の床反力を少なくとも該二足歩行移動体の上体の所定部位の加速度を検出するべく該上体に装着した加速度センサの検出出力と該上体の傾斜角度を検出するべく該上体に装着した上体傾斜センサの検出出力とを用いて逐次推定するステップと、前記二足歩行移動体を複数の剛体の連結体として表してなる剛体リンクモデルの各剛体に対応する二足歩行移動体の各剛体相当部の傾斜角度、該剛体相当部の重心の加速度及び該剛体相当部の角加速度を少なくとも前記上体の傾斜センサと該二足歩行移動体の各脚体の関節の屈曲角度を検出するべく該関節に装着した角度センサの検出出力とを用いて逐次把握するステップとを備え、

前記床反力の推定値と、前記床反力作用点の位置の推定値と、前記各剛体相当部の傾斜角度、該剛体相当部の重心の加速度及び該剛体相当部の角加速度と、各剛体相当部のあらかじめ求めた重量及びサイズと、各剛体相当部における該剛体相当部のあらかじめ求めた重心の位置と、各剛体相当部のあらかじめ求めた慣性モーメントとを用いて逆動力モデルに基づき前記二足歩行移動体の各脚体の少なくとも一つの関節に作用するモーメントを推定することを特徴とする二足歩行移動体の関節モーメント推定方法。

**【発明の詳細な説明】****【0001】****【発明の属する技術分野】**

本発明は、人間や二足歩行ロボット等の二足歩行移動体の各脚体毎の床反力作用点の位置を推定する方法に関する。さらに、その床反力作用点の位置の推定値を用いて二足歩行移動体の脚体の関節に作用するモーメントを推定する方法に関する。

**【0002】****【従来の技術】**

例えば人間の歩行動作を補助する歩行アシスト装置の動作制御や、二足歩行ロボットの移動動作の制御を行なう場合、人間や二足歩行ロボットの脚体に作用する床反力（詳しくは、脚体の接地部に床から作用する力）と床反力作用点の位置とを逐次把握することが必要となる。この床反力および床反力作用点を把握することで、二足歩行移動体の脚体の関節に作用するモーメント等を把握することが可能となり、その把握されたモーメント等に基づいて歩行アシスト装置の目標補助力や、二足歩行ロボットの各関節の目標駆動トルク等を決定することが可能となる。

**【0003】**

前記床反力を把握する手法としては、例えば特開2000-249570号公報に開示されているものが知られている。この技術では、二足歩行移動体の定常的な歩行時に各脚体の床反力の経時変化の波形が周期的に変化することから、各脚体の床反力を、歩行周期の $1/n$  ( $n=1, 2, \dots$ ) の互いに異なる周期を有する複数の三角関数の合成値（一次結合）として把握するものである。しかし、この技術では、床反力作用点の位置を把握することはできず、二足歩行移動体の脚体の関節に作用するモーメントを把握するには不十分である。

**【0004】**

また、床に設置したフォースプレート上で二足歩行移動体を歩行させ、該フォースプレートの出力により床反力および床反力作用点の位置を把握する手法も知られている（例えば特開2001-29329号公報を参照）。しかし、この技術では、フ

ォースプレートが設置された環境下でしか床反力および床反力作用点の位置を把握できず、通常的环境下での二足歩行移動体の歩行には適用できないという問題がある。

#### 【0005】

そこで、本願出願人は、先に、例えば特願2002-18798号にて、床反力作用点の位置をリアルタイムで推定できる手法を提案している。この手法は、各脚体の大腿部の傾斜角度、あるいは、膝関節の屈曲角度が各脚体の足首部に対する床反力作用点の位置（足首部を基準とした床反力作用点の位置ベクトル）との間に比較的高い相関性を有することを利用したものである。すなわち、この手法では、大腿部の傾斜角度、あるいは、膝関節の屈曲角度と、床反力作用点の位置との相関関係を表す相関データ（例えばデータテーブルや演算式）があらかじめ作成されて記憶保持され、この相関データと、二足歩行移動体の歩行時に計測される大腿部の傾斜角度又は膝関節の屈曲角度とから、床反力作用点の位置が推定される。

#### 【0006】

##### 【特許文献1】

特開 2000-249570 号公報

##### 【特許文献2】

特開 2001-29329 号公報

#### 【0007】

##### 【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、本願発明者等のさらなる実験・検討によって、大腿部の傾斜角度、あるいは、膝関節の屈曲角度と、床反力作用点の位置との相関関係は、二足歩行移動体の歩行速度等の影響を受け、さらには、平地歩行、階段歩行、坂道歩行等、二足歩行移動体の運動形態の影響も受けることが判明した。このため、上記手法により、床反力作用点の位置を適正に推定するためには、前記相関データを二足歩行移動体の歩行速度や運動形態の種別毎に複数種類用意して、記憶保持しておかなければならず、その記憶保持のためにメモリの多くの容量を必要とするという不都合があった。また、運動形態が切り替わるときに、その切り替わり前後で各別の相関データに基づいて推定される床反力作用点の位置の不連続が生



じやすく、ひいては、その床反力作用点の推定位置を用いて関節モーメントを推定したときに、該関節モーメントの推定値も不連続に変化してしまうという不都合もあった。

#### 【0008】

本発明はかかる背景に鑑みてなされたものであり、複数種類の相関データを用いることなく、床反力作用点の位置を比較的簡単な手法でリアルタイムに把握することができ、特に二足歩行移動体としての人間に係る床反力作用点の位置を把握する上で好適な床反力作用点推定方法を提供することを目的とする。

#### 【0009】

さらに、その床反力作用点の推定値を用いて脚体の膝関節等の関節に作用するモーメントをリアルタイムに把握することができる二足歩行移動体の関節モーメント推定方法を提供することを目的とする。

#### 【0010】

##### 【課題を解決するための手段】

本願発明者等が種々様々な実験等により鋭意努力して知見したところによれば、人間等の二足歩行移動体が平地歩行等の運動を行っているとき、接地している各脚体の床反力作用点の水平方向位置は、二足歩行移動体の移動速度や運動形態等によらずに、該脚体が足平部のどの箇所で接地しているかによって、概ね、二足歩行移動体の重心の水平方向位置、該脚体の足平部の中足趾節関節（足平部の親指の付け根の関節）の水平方向位置、および該脚体の足首関節の水平方向位置のいずれかの位置とほぼ同等になる。すなわち、各脚体について、その足平部の踵側を接地させずに中足趾節関節のほぼ直下の箇所（つま先側の箇所）で接地していれば、該脚体に係る床反力作用点の水平方向位置は、中足趾節関節の水平方向位置とほぼ同等になり、足平部のつま先側を接地させずに足首関節のほぼ直下の箇所（踵側の箇所）で接地していれば、該脚体に係る床反力作用点の水平方向位置は、足首関節の水平方向位置とほぼ同等になる。また、足平部のつま先側および踵側の両者の箇所が接地（足平部の底面のほぼ全面で接地）していれば、該脚体に係る床反力作用点の水平方向位置は、二足歩行移動体の重心の水平方向位置とほぼ同等になる場合が多い。従って、二足歩行移動体の重心、各脚体の足首

関節、および中足趾節関節の位置（特に水平方向位置）を逐次把握するとともに、接地している各脚体の足平部のどの箇所が接地しているかを把握すれば、該脚体に係る床反力作用点の水平方向位置を推定することが可能である。また、接地している各脚体の床反力作用点の鉛直方向位置、特に足首関節に対する鉛直方向位置は、該脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離により定まる。

#### 【0011】

そこで、本発明の二足歩行移動体の床反力作用点推定方法、すなわち二足歩行移動体の各脚体毎の床反力作用点の位置を逐次推定する方法は、前記の目的を達成するために、前記二足歩行移動体の各脚体の足平部の底面のうち、該脚体の足首関節の直下箇所と該脚体の足平部の中足趾節関節の直下箇所とにそれぞれ当該直下箇所の接地の有無に応じた接地検知信号を出力する第1接地センサおよび第2接地センサを設けておく。そして、前記二足歩行移動体の運動中に、該二足歩行移動体の重心の位置と各脚体の足首関節の位置と該脚体の足平部の中足趾節関節の位置とをそれぞれ逐次把握すると共に、接地している各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離を逐次把握する第1ステップと、前記二足歩行移動体の運動中に接地している各脚体毎に、少なくとも各脚体の前記第1接地センサの接地検知信号による接地の有無と前記第2接地センサの接地検知信号による接地の有無との組合わせに応じて、第1ステップで位置を求めた前記重心、該脚体の足首関節および該脚体の中足趾節関節のうちのいずれか一つの水平方向位置を選択的に該脚体の床反力作用点の水平方向位置として逐次推定すると共に、該脚体の床反力作用点の鉛直方向位置を、前記第1ステップで求めた該脚体の足首関節から接地面までの前記鉛直方向距離だけ該足首関節から鉛直方向下方に離れた位置として逐次推定する第2ステップとを備える。

#### 【0012】

かかる本発明の床反力作用点推定方法によれば、二足歩行移動体の重心の位置と各脚体の足首関節の位置と該脚体の足平部の中足趾節関節の位置とをそれぞれ逐次把握しておき、各脚体の足平部の底面の2つの箇所（足首関節の直下箇所と中足趾節関節の直下箇所）にそれぞれ設けた第1および第2接地センサの接地検知信号によるそれぞれの箇所の接地の有無の組合わせに応じて、前記重心、足首

関節および中足趾節関節のうちのいずれか一つの水平方向位置が選択的に該脚体の床反力作用点の水平方向位置として逐次推定される。このため、データテーブルやマップデータ等を使用することなく、床反力作用点の水平方向位置を推定することができる。また、前記第1ステップで接地している各脚体の足首関節から接地面（床面）までの鉛直方向距離を逐次把握しておくことで、その鉛直方向距離だけ足首関節から鉛直方向下方に離れた位置を床反力作用点の鉛直方向位置として推定するので、データテーブルやマップデータ等を使用することなく、床反力作用点の水平方向位置を推定することができる。

#### 【0013】

従って、本発明の床反力作用点推定方法によれば、複数種類の相関データを用いることなく、床反力作用点の位置を比較的簡単な手法でリアルタイムに把握することができる。

#### 【0014】

なお、本発明の床反力作用点推定方法で、前記重心の位置、足首関節の位置、および中足趾節関節の位置は、例えば上体の傾斜角度をジャイロセンサや加速度センサにより検出すると共に、各脚体の関節の屈曲角度をポテンシオメータ等を用いて検出し、それらの検出した上体の傾斜角度および脚体の関節の屈曲角度と、二足移動体を剛体の連結体として表現してなる剛体リンクモデルとを用いて把握することが可能である。

#### 【0015】

かかる本発明の床反力作用点推定方法では、基本的には、各脚体の第1接地センサの接地検知信号が接地有りを示す信号であり、且つ該脚体の第2接地センサの接地検知信号が接地無しを示す信号であるときには、該脚体の足首関節の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定し、各脚体の第1接地センサの接地検知信号が接地無しを示す信号であり、且つ該脚体の第2接地センサの接地検知信号が接地有りを示す信号であるときには、該脚体の中足趾節関節の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定し、各脚体の第1接地センサ及び第2接地センサの両者の接地検知信号が接地有りを示す信号であるときには、前記重心の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向

位置として推定すればよい。

【0016】

但し、二足歩行移動体の運動形態等によっては、第1接地センサ及び第2接地センサの両者の接地検知信号が接地有りを示す信号であるとき、すなわち、足首関節の直下の箇所（踵側の底面）と中足趾節関節の直下の箇所（つま先側の底面）とが接地（荷重がほとんど発生しない接触を含む）しているとき、二足歩行移動体の重心の位置が、二足歩行移動体の進行方向において、接地している脚体の足首関節の位置よりも後側に存在したり、あるいは、中足趾節関節の位置よりも前側に存在するような状況が生じることがある。このような場合には、重心の水平方向位置が脚体の接地面から逸脱するので、該重心の水平方向位置を床反力作用点の水平方向位置として推定すると、その推定位置は、脚体の接地面内に存在すべき本来の床反力作用点の水平方向位置に対して不正確なものとなる。また、二足歩行移動体の重心が接地している脚体の足首関節の位置よりも後側に存在するような状況では、該脚体に係る床反力は、一般に該脚体の足平部の踵寄りの箇所（すなわち前記第1接地センサの近傍箇所）に集中する。さらに二足歩行移動体の重心が接地している脚体の足平部の中足趾節関節の位置よりも前側に存在するような状況では、該脚体に係る床反力は、一般に該脚体のつま先寄りの箇所（すなわち前記第1接地センサの近傍箇所）に集中する。

【0017】

そこで、本発明の床反力作用点推定方法では、前記第2ステップで前記床反力作用点の水平方向位置を推定するとき、接地している各脚体毎に、各脚体の第1接地センサの接地検知信号が接地有りを示す信号であり、且つ該脚体の第2接地センサの接地検知信号が接地無しを示す信号であるときには、該脚体の足首関節の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定し、各脚体の第1接地センサの接地検知信号が接地無しを示す信号であり、且つ該脚体の第2接地センサの接地検知信号が接地有りを示す信号であるときには、該脚体の中足趾節関節の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定し、各脚体の第1接地センサ及び第2接地センサの両者の接地検知信号が接地有りを示す信号であり、且つ、前記重心の位置が該脚体の足首関節の位置よりも前記二

足歩行移動体の進行方向で後側に存在するときには、該脚体の足首関節の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定し、各脚体の第1接地センサ及び第2接地センサの両者の接地検知信号が接地有りを示す信号であり、且つ、前記重心の位置が該脚体の中足趾節関節の位置よりも前記二足歩行移動体の進行方向で前側に存在するときには、該脚体の中足趾節関節の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定し、各脚体の第1接地センサ及び第2接地センサの両者の接地検知信号が接地有りを示す信号であり、且つ、前記重心の位置が前記二足移動体の進行方向で該脚体の足首関節の位置と中足趾節関節の位置との間に存在するときには、前記重心の水平方向位置を該脚体の床反力作用点の水平方向位置として推定することが好適である。

#### 【0018】

このようにすることにより、二足歩行移動体の運動形態等によらずに、床反力作用点の水平方向位置の推定精度を高めることができる。

#### 【0019】

また、本発明の床反力作用点推定方法では、床反力作用点の鉛直方向位置の推定に関しては、例えば前記二足歩行移動体の直立停止状態における各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離をあらかじめ計測して記憶保持しておき、前記第1ステップで前記接地している各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離を把握するとき、前記記憶保持した鉛直方向距離を、前記接地している各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離として把握する。なお、二足歩行移動体の直立停止状態は、より詳しく言えば、二足歩行移動体が、その両脚体および上体をほぼ鉛直方向に伸ばし、両脚体の足平部の底面のほぼ全面を接地させて起立した状態を意味する。

#### 【0020】

すなわち、本願発明者等の知見によれば、接地している脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離は、一般に、二足歩行移動体の平地歩行等の運動中にさほど大きく変化することはなく、二足歩行移動体の直立停止状態における各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離に概略的にはほぼ同等となる。従って、その直立停止状態における各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離を

あらかじめ計測して記憶保持しておき、その記憶保持した鉛直方向距離を、二足歩行移動体の運動中に接地している脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離として把握することで、簡単に床反力作用点の鉛直方向位置を推定できる。

#### 【0021】

さらにより精度よく、床反力作用点の鉛直方向位置を推定するためには、前記二足歩行移動体の直立停止状態における各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離と該脚体の中足趾節関節から接地面までの鉛直方向距離とをそれぞれ第1基本鉛直方向距離及び第2基本鉛直方向距離としてあらかじめ計測して記憶保持しておき、前記第1ステップで前記接地している各脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離を把握するとき、前記重心の位置が該脚体の中足趾節関節の位置よりも二足歩行移動体の進行方向で後側に存在するときには、前記第1基本鉛直方向距離を該脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離として把握し、前記重心の位置が該脚体の中足趾節関節の位置よりも二足歩行移動体の進行方向で前側に存在するときには、該脚体の足首関節と中足趾節関節との間の鉛直方向距離を求めた後、その求めた鉛直方向距離に前記第2基本鉛直方向距離を加えた値を該脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離として把握することが好ましい。

#### 【0022】

すなわち、前記重心の位置が脚体の中足趾節関節の位置よりも二足歩行移動体の進行方向で後側に存在するときには、該脚体の足平部は、少なくともその踵の底面を接地させているので、二足歩行移動体の運動中に接地している脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離は、前記第1基本鉛直方向距離にほぼ等しい。また、重心の位置が脚体の中足趾節関節の位置よりも二足歩行移動体の進行方向で前側に存在するときには、該脚体の足平部は、一般に踵を浮かせて、つま先側の箇所（中足趾節関節の近傍箇所）で接地させている。そして、この場合には、該脚体の足平関節から接地面までの鉛直方向距離は、該足平関節と中足趾節関節との間の鉛直方向距離に、前記第2基本鉛直方向距離を加えた値にほぼ等しい。そして、この場合、足平関節と中足趾節関節との間の鉛直方向距離は前記第1ステップで把握したそれらの関節の位置から求めることができる。

## 【0023】

従って、重心の位置が脚体の中足趾節関節の位置よりも二足歩行移動体の進行方向で後側に存在するか前側に存在するかで上記の如く、脚体の足首関節から接地面までの鉛直方向距離を把握することで、その鉛直方向距離の精度を高めることができ、ひいては、床反力作用点の鉛直方向位置の推定値の精度をより高めることができる。

## 【0024】

次に、本発明の二足歩行移動体の関節モーメント推定方法は、前述した本発明の床反力推定方法により逐次求めた床反力作用点の位置の推定値を用いて二足歩行移動体の各脚体の少なくとも一つの関節に作用するモーメントを推定する方法である。そして、この関節モーメント推定方法は、前記二足歩行移動体の接地している各脚体の床反力を少なくとも該二足歩行移動体の上体の所定部位の加速度を検出するべく該上体に装着した加速度センサの検出出力と該上体の傾斜角度を検出するべく該上体に装着した上体傾斜センサの検出出力とを用いて逐次推定するステップと、前記二足歩行移動体を複数の剛体の連結体として表してなる剛体リンクモデルの各剛体に対応する二足歩行移動体の各剛体相当部の傾斜角度、該剛体相当部の重心の加速度及び該剛体相当部の角加速度を少なくとも前記上体の傾斜センサの検出出力と該二足歩行移動体の各脚体の関節の屈曲角度を検出するべく該関節に装着した角度センサの検出出力とを用いて逐次把握するステップとを備え、前記床反力の推定値と、前記床反力作用点の位置の推定値と、前記各剛体相当部の傾斜角度、該剛体相当部の重心の加速度及び該剛体相当部の角加速度と、各剛体相当部のあらかじめ求めた重量及びサイズと、各剛体相当部における該剛体相当部のあらかじめ求めた重心の位置と、各剛体相当部のあらかじめ求めた慣性モーメントとを用いて逆動力学モデルに基づき前記二足歩行移動体の各脚体の少なくとも一つの関節に作用するモーメントを推定することを特徴とするものである。

## 【0025】

かかる本発明の関節モーメント推定方法では、詳細は後述するが、二足歩行移動体の上体（胴体）の所定部位（例えば腰部）の加速度を加速度センサで逐次検

出すると共に、上体の傾斜角度を上体傾斜センサで逐次検出すれば、それらの検出出力（検出値）を用いて、接地している各脚体に作用する床反力を逐次推定することができる。さらに、上体の傾斜角度を上体傾斜センサで検出することに加えて、各脚体の関節の屈曲角度を角度センサで逐次検出すれば、それらの上体傾斜センサ及び角度センサの検出出力（検出値）を用いて、二足歩行移動体を表す剛体リンクモデルの各剛体相当部（大腿部や下腿部等）の傾斜角度（これは各剛体相当部の相互の姿勢関係を表す）、該剛体相当部の重心の加速度および該剛体相当部の角加速度を逐次把握できる。すなわち、上体の傾斜角度と各脚体の関節の屈曲角度とがわかれば、各剛体相当部の相互の姿勢関係がわかるので、各剛体相当部の傾斜角度がわかる。さらに各剛体相当部における該剛体相当部の重心の位置（各剛体相当部に固定した座標系での該剛体相当部の重心の位置）はあらかじめ求めておくことができるので、これと各剛体相当部の相互の姿勢関係とから、二足歩行移動体に全体における（剛体リンクモデルの全体における）各剛体相当部の重心の位置（二足歩行移動体の任意の位置（例えば腰部）に定めた基準点に対する位置）が判る。そして、各剛体相当部の重心の位置の二階微分値として、該重心の加速度を把握できる。また、各剛体相当部の傾斜角度がわかれば、その二階微分値として各剛体相当部の角加速度を把握できる。

#### 【0026】

そして、上述のように二足歩行移動体の床反力を推定すると共に、各剛体相当部の傾斜角度、該剛体相当部の重心の加速度、および該剛体相当部の角加速度を把握したとき、前記床反力作用点推定方法により求められる床反力作用点の推定値と併せて、それらのデータと、各剛体相当部のあらかじめ求めた重量及びサイズ（特に長さ）と、各剛体相当部における該剛体相当部のあらかじめ求めた重心の位置と、各剛体相当部のあらかじめ求めた慣性モーメントとを用いて、公知の所謂逆動力学モデルに基づいて各脚体の膝関節や股関節に作用するモーメントを推定することができる。この逆動力学モデルに基づく手法は、それを簡略的に言えば、二足歩行移動体の各剛体相当部の重心の並進運動に関する運動方程式と、該剛体相当部の回転運動（例えば該剛体相当部の重心の回りの回転運動）に関する運動方程式とを用いて剛体リンクモデルの各関節に相当する二足歩行移動体の



各関節に作用するモーメントを床反力作用点により近いものから順番に求めていくものである。詳細は後述するが、例えば各脚体が大腿部及び下腿部をそれぞれ剛体相当部として有する連結体であるとした場合、各脚体の下腿部の重心の並進運動に関する運動方程式に、該下腿部の重心の加速度、該脚体に作用する床反力の推定値、下腿部の重量の値を適用することで、該脚体の膝関節に作用する力（関節反力）が判る。さらに、該脚体の膝関節に作用する関節反力と、該脚体の下腿部の角加速度と、該脚体の床反力作用点の推定位置と、該脚体の床反力の推定値と、該下腿部における該下腿部の重心の位置及び該下腿部のサイズ（長さ）に係わるデータ値と、該下腿部の慣性モーメントの値と、該下腿部の傾斜角度の値とを該下腿部の回転運動に関する運動方程式に適用することで、該脚体の膝関節のモーメントを推定することができる。

#### 【0027】

また、各脚体の大腿部の重心の並進運動に関する運動方程式に、該大腿部の重心の加速度、該脚体の膝関節に作用する関節反力、大腿部の重量の値とを適用することで、該脚体の股関節に作用する関節反力が判る。さらに、該脚体の膝関節及び股関節にそれぞれ作用する関節反力と、該脚体の大腿部の角加速度と、該大腿部における該大腿部の重心の位置及び該大腿部のサイズ（長さ）に係わるデータ値と、該大腿部の慣性モーメントの値と、該大腿部の傾斜角度の値とを該大腿部の回転運動に関する運動方程式に適用することで、該脚体の股関節のモーメントを推定することができる。

#### 【0028】

かかる本発明の関節モーメント推定方法によれば、前述の本発明の床反力作用点推定方法により推定した床反力作用点を用いて脚体の関節に作用するモーメントを推定することにより、多種類の相関データをあらかじめ用意したり、二足歩行移動体に比較的大型なセンサ等を装備したりすることなく、脚体の関節に作用するモーメントを比較的簡単な演算処理でリアルタイムに推定することができる。

#### 【0029】

#### 【発明の実施の形態】

以下に図面を参照しつつ、本発明の床反力作用点推定方法及び関節モーメント推定方法を適用した実施形態を説明する。まず、理解の便宜上、本実施形態における二足歩行移動体の床反力推定手法の基本的な考え方を図1を参照して説明しておく。二足歩行移動体の脚体の運動状態、例えば歩行動作時の脚体の運動状態は、図1(a)に例示するように二足歩行移動体1の両脚体2, 2のうちの一方の脚体2(図では二足歩行移動体1の進行方向で前側の脚体)のみが接地する単脚支持状態と、図1(b)に示すように両脚体2, 2が接地する両脚支持状態とがある。

#### 【0030】

ここで、まず、前記単脚支持状態において、二足歩行移動体1が運動を行う床に対して固定的な絶対座標系における該二足歩行移動体1の重心の運動方程式(詳しくは重心の並進運動に関する運動方程式)は、該重心の加速度と二足歩行移動体の重量との積が、該重心に作用する重力(=二足歩行移動体の重量×重力加速度)と、接地している脚体の接地部に床から作用する床反力との合力に等しいという関係式になる。具体的には、例えば図1(a)に示すように、床Aに対して固定した絶対座標系Cfにおいて、二足歩行移動体1の重心G0の加速度aのX軸方向(二足歩行移動体1の進行方向での水平方向)、Z軸方向(鉛直方向)の成分をそれぞれ $a_x$ ,  $a_z$ 、接地している脚体2(支持脚側の脚体2)に係る床反力FのX軸方向、Z軸方向の成分をそれぞれ $F_x$ ,  $F_z$ とおくと、重心G0の運動方程式は、次式(1)により表される。

#### 【0031】

$$T(F_x, F_z - M \cdot g) = M \cdot T(a_x, a_z) \quad \cdots \cdots (1)$$

(但し、M:二足歩行移動体の重量、g:重力加速度)

尚、式(1)中の両辺の括弧部分 $T( \quad , \quad )$ は2成分のベクトルを意味している。本明細書では $T( \quad , \quad )$ という形の表記は、ベクトルを表す。

#### 【0032】

従って、二足歩行移動体1の重心G0の加速度 $a = T(a_x, a_z)$ を把握すれば、その加速度aと、二足歩行移動体1の重量Mの値と、重力加速度gの値とを用いて、次式(2)により、床反力 $F = T(F_x, F_z)$ の推定値を得ることができるこ

となる。

【0033】

$$T(F_x, F_z) = M \cdot T(a_x, a_z - g) \quad \dots\dots (2)$$

この場合、床反力  $F$  の推定値を得るために必要な重量  $M$  は、あらかじめ計測等により把握することができる。また、重心  $G0$  の位置や加速度  $a$  については、詳細は後述するが、二足歩行移動体 1 の各関節の屈曲角度（回転角度）を検出するセンサや、加速度センサ、ジャイロセンサ等のセンサの出力を用いて公知の手法等により逐次把握することが可能である。

【0034】

また、前記両脚接地状態における二足歩行移動体 1 の重心の運動方程式（詳しくは重心の並進運動に関する運動方程式）は、該重心の加速度と二足歩行移動体 1 の重量との積が、該重心に作用する重力（＝二足歩行移動体の重量×重力加速度）と、両脚体 2, 2 のそれぞれの接地部に床から作用する床反力（両脚体 2, 2 にそれぞれ対応する二つの床反力）との合力に等しいという関係式になる。具体的には、図 1（b）に示すように二足歩行移動体 1 の進行方向に向かって前側の脚体 2 に係る床反力  $F_f$  の  $XZ$  座標成分を  $F_{fx}$ ,  $F_{fz}$ 、後側の脚体 2 に係る床反力  $F_r$  の  $XZ$  座標成分を  $F_{rx}$ ,  $F_{rz}$  とおくと、重心  $G0$  の運動方程式は、次式（3）により表される。

【0035】

$$T(F_{fx} + F_{rx}, F_{fz} + F_{rz} - M \cdot g) = M \cdot T(a_x, a_z) \quad \dots\dots (3)$$

尚、式（3）中の  $a_x$ ,  $a_z$ ,  $M$ ,  $g$  の意味は前述のとおりである。

【0036】

一方、本願発明者等の知見によれば、両脚支持状態において、各脚体 2, 2 にそれぞれ係る床反力  $F_f$ ,  $F_r$  は、概ね、図 1（b）に示すように、各脚体 2, 2 の下端部近傍の特定部位、例えば足首関節  $12f$ ,  $12r$  の部分から二足歩行移動体 1 の重心  $G0$  に向かって作用するとみなすことができる。そして、このとき、前記重心  $G0$  に対する各脚体 2, 2 の前記足首関節  $12f$ ,  $12r$  の位置と、各脚体 2, 2 に作用する床反力  $F_f$ ,  $F_r$  との間には一定の関係式、すなわち、前記重心  $G0$  と各脚体 2, 2 の足首関節  $12f$ ,  $12r$  とを結ぶ線分の向き（該重心  $G0$  に

対する該足首関節 1 2 f, 1 2 r の位置ベクトルの向き) が該脚体 2, 2 に係る床反力  $F_f$ ,  $F_r$  の向きに等しいという関係を表す関係式が成立する。

【0037】

具体的には、図 1 (b) を参照して、前記絶対座標系  $C_f$  における重心  $G_0$  の位置の座標を  $(X_g, Z_g)$ 、前側脚体 2 の足首関節 1 2 f の位置の座標を  $(X_f, Z_f)$ 、後側脚体 2 の足首関節 1 2 r の位置の座標を  $(X_r, Z_r)$  とおくと、上記の関係式は次式 (4) となる。

【0038】

$$\begin{aligned} (Z_f - Z_g) / (X_f - X_g) &= F_{fz} / F_{fx} \\ (Z_r - Z_g) / (X_r - X_g) &= F_{rz} / F_{rx} \\ &\dots\dots (4) \end{aligned}$$

そして、この式 (4) と前記式 (3) とから次式 (5) が得られる。

【0039】

$$\begin{aligned} F_{fx} &= M \cdot \{ \Delta X_f \cdot (\Delta Z_r \cdot a_x - \Delta X_r \cdot a_z \\ &\quad - \Delta X_r \cdot g) \} / (\Delta X_f \cdot \Delta Z_r - \Delta X_r \cdot \Delta Z_f) \\ F_{fz} &= M \cdot \{ \Delta Z_f \cdot (\Delta Z_r \cdot a_x - \Delta X_r \cdot a_z \\ &\quad - \Delta X_r \cdot g) \} / (\Delta X_f \cdot \Delta Z_r - \Delta X_r \cdot \Delta Z_f) \\ F_{rx} &= M \cdot \{ \Delta X_r \cdot (-\Delta Z_f \cdot a_x + \Delta X_f \cdot a_z \\ &\quad + \Delta X_f \cdot g) \} / (\Delta X_f \cdot \Delta Z_r - \Delta X_r \cdot \Delta Z_f) \\ F_{rz} &= M \cdot \{ \Delta Z_r \cdot (-\Delta Z_f \cdot a_x + \Delta X_f \cdot a_z \\ &\quad + \Delta X_f \cdot g) \} / (\Delta X_f \cdot \Delta Z_r - \Delta X_r \cdot \Delta Z_f) \\ &\dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\text{但し、} \Delta X_f &= X_f - X_g, \Delta Z_f = Z_f - Z_g, \\ \Delta X_r &= X_r - X_g, \Delta Z_r = Z_r - Z_g) \end{aligned}$$

従って、二足歩行移動体 1 の重心  $G_0$  の加速度  $a = T(a_x, a_z)$  を把握すると共に、二足歩行移動体 1 の重心  $G_0$  に対する各脚体 2, 2 のそれぞれの足首関節 1 2 f, 1 2 r の位置 (これは式 (5) では  $\Delta X_f$ ,  $\Delta Z_f$ ,  $\Delta X_r$ ,  $\Delta Z_r$  により表される) を把握すれば、その加速度  $a$  及び足首関節 1 2 f, 1 2 r の位置と、二足歩行移動体 1 の重量  $M$  の値と、重力加速度  $g$  の値とを用いて、前記式 (5) によ

り、各脚体 2 毎の床反力  $F_f = T(F_{fx}, F_{fz})$ 、 $F_r = T(F_{rx}, F_{rz})$  の推定値を得ることができることとなる。

#### 【0040】

この場合、床反力  $F_f$ 、 $F_r$  の推定値を得るために必要な重量  $M$  は、あらかじめ計測等により把握することができる。また、重心  $G_0$  の加速度  $a$  や重心  $G_0$  の位置、該重心  $G_0$  に対する前記足首関節  $12f$ 、 $12r$  の位置については、詳細は後述するが、二足歩行移動体 1 の各関節の屈曲角度（回転角度）を検出するセンサや、加速度センサ、ジャイロセンサ等のセンサの出力を用いて、公知の手法等により逐次把握することが可能である。

#### 【0041】

以下に説明する実施形態（第 1 および第 2 実施形態）は、上記に説明した事項を基礎として各脚体 2 の床反力を推定しつつ、各脚体 2 の床反力作用点および関節モーメントを推定するものである。

#### 【0042】

以下に、二足歩行移動体としての人間に本発明を適用した第 1 実施形態について詳説する。

#### 【0043】

図 2 に模式化して示すように、人間 1 は、その構成を大別すると、左右一対の脚体 2、2 と、腰部 3 及び胸部 4 からなる胴体 5 と、頭部 6 と、左右一対の腕体 7、7 とを有する。胴体 5 は、その腰部 3 が脚体 2、2 のそれぞれに左右一対の股関節 8、8 を介して連結され、両脚体 2、2 上に支持されている。また、胴体 5 の胸部 4 は、腰部 3 の上側に該腰部 3 に対して人間 1 の前方側に傾斜可能に存している。そして、この胸部 4 の上部の左右両側部から腕体 7、7 が延設され、該胸部 4 の上端部に頭部 6 が支持されている。

#### 【0044】

各脚体 2、2 は、股関節 8 から延在する大腿部 9 と、該大腿部 9 の先端から膝関節 10 を介して延在する下腿部 11 とを有し、下腿部 11 の先端部に、足首関節 12 を介して足平部 13 が連結されている。

#### 【0045】

本実施形態では、このような構成を有する人間 1 の各脚体 2 に作用する床反力及びその作用点の推定、さらには膝関節 10 及び股関節 8 に作用するモーメントの推定を行うために、次のような装置を人間 1 に装備している。

#### 【0046】

すなわち、胴体 5 の胸部 4 には、胸部 4 の傾斜に伴う角速度に応じた出力を発生するジャイロセンサ 14（以下、胸部ジャイロセンサ 14 という）と、胸部 4 の前後方向の加速度に応じた出力を発生する加速度センサ 15（以下、胸部前後加速度センサ 15 という）と、CPU、RAM、ROM等から構成される演算処理装置 16 と、該演算処理装置 16 等の電源となるバッテリー 17 とが装着されている。この場合、これらの胸部ジャイロセンサ 14、胸部前後加速度センサ 15、演算処理装置 16 及びバッテリー 17 は、例えば胸部 4 に図示しないベルト等を介して固定されるショルダーバッグ状の收容部材 18 に收容され、該收容部材 18 を介して胸部 4 に一体的に固定されている。

#### 【0047】

尚、胸部加速度センサ 15 の出力が表す加速度は、より詳しくは、胸部 4 の水平断面方向（胸部 4 の軸心と直交する方向）での前後方向の加速度であり、人間 1 が平地に直立姿勢で起立した状態では、前後水平方向（図 2 の絶対座標系 Cf の X 軸方向）での加速度であるが、腰部 3 あるいは胸部 4 が鉛直方向（図 2 の絶対座標系 Cf の Z 軸方向）から傾斜した状態では、胸部 4 の鉛直方向に対する傾斜角度分だけ水平方向に対して傾斜した方向での加速度となる。

#### 【0048】

また、胴体 5 の腰部 3 には、腰部 3 の傾斜に伴う角速度に応じた出力を発生するジャイロセンサ 19（以下、腰部ジャイロセンサ 19 という）と、腰部 3 の前後方向の加速度に応じた出力を発生する加速度センサ 20（以下、腰部前後加速度センサ 20 という）と、腰部 3 の上下方向の加速度に応じた出力を発生する加速度センサ 21（以下、腰部上下加速度センサ 21 という）とが、図示しないベルト等の固定手段を介して一体的に装着・固定されている。

#### 【0049】

ここで、腰部前後加速度センサ 20 は、より詳しくは胸部前後加速度センサ 1

5と同様、腰部3の水平断面方向（腰部3の軸心と直交する方向）での前後方向の加速度を検出するセンサである。また、腰部上下加速度センサ21は、より詳しくは、腰部3の軸心方向での上下方向の加速度（これは腰部前後加速度センサ20が検出する加速度と直交する）を検出するセンサである。尚、腰部前後加速度センサ20及び腰部上下加速度センサ21は、二軸型の加速度センサにより一体的に構成されたものであってもよい。

#### 【0050】

さらに各脚体2の股関節8と膝関節10と足首関節12とには、それぞれの屈曲角度 $\Delta\theta_c$ 、 $\Delta\theta_d$ に応じた出力を発生する股関節角度センサ22および膝関節角度センサ23が装着されている。尚、股関節角度センサ22については、図2では手前側（人間1の前方に向かって右側）の脚体2の股関節8に係わる股関節角度センサ22のみが図示されているが、他方側（人間1の前方に向かって左側）の脚体2の股関節8には、手前側の股関節角度センサ22と同心に、股関節角度センサ22が装着されている。

#### 【0051】

これらの角度センサ22、23は、例えばポテンショメータにより構成されたものであり、各脚体2に図示しないバンド部材等の手段を介して装着されている。ここで、本実施形態の例では、各股関節角度センサ22が検出する屈曲角度 $\Delta\theta_c$ は、より詳しくは、腰部3と各脚体2の大腿部9との姿勢関係が所定の姿勢関係（例えば人間1の直立停止状態のように腰部3の軸心と大腿部9の軸心とがほぼ平行となる姿勢関係）にあるときを基準とした、腰部3に対する各脚体2の大腿部9の股関節8回り（人間1の左右方向における股関節8の軸心回り）の回転角度である。同様に、各膝関節角度センサ23が検出する屈曲角度 $\Delta\theta_d$ は、各脚体2の大腿部9と下腿部11との姿勢関係が所定の姿勢関係（例えば大腿部9の軸心と下腿部11の軸心とがほぼ平行となる姿勢関係）にあるときを基準とした、大腿部9に対する下腿部11の膝関節10回り（人間1の左右方向における膝関節10の軸心回り）の回転角度である。ここで、大腿部9の軸心は、該大腿部9の一端の関節（股関節8）の中心と他端の関節（膝関節10）の中心を結ぶ直線である。同様に、下腿部11の軸心はその両端の関節（膝関節10および

足首関節 12) のそれぞれの中心を結ぶ直線である。

#### 【0052】

さらに、各脚体 2 の足平部 13 の底面の 2 つの箇所には、それらの箇所の接地の有無を検出する接地センサ 51 f, 51 r が装着されている。より詳しくは、接地センサ 51 f, 51 r は、人間 1 が履く各足平部 13 の靴底に装着されている。この場合、各足平部 13 の接地センサ 51 f, 51 r は、それぞれ本発明における第 2 接地センサ、第 1 接地センサに相当するものであり、それぞれ足平部 13 の中足趾節関節 13 a (図 2 に黒点で示す。以下、MP 関節 13 a という) の直下箇所と、足首関節 12 の直下箇所とに前後方向に離間して設けられ、それぞれの該当箇所の接地の有無に応じて ON/OFF 信号を出力する。なお、前記 MP 関節 13 a は、より詳しくは足平部 13 の親指の付け根の関節である。また、MP 関節 13 a の直下箇所というのは、より正確には、人間 1 がほぼ直立した起立姿勢で、その足平部 13 の底面のほぼ全体を平坦な床面に接地させた状態での MP 関節 13 a の鉛直下方箇所という意味であり、足首関節 12 の直下箇所についても同様である。以下の説明では、接地センサ 51 f を MP 直下接地センサ 51 f、接地センサ 51 r を足首直下接地センサ 51 r と称することがある。

#### 【0053】

前記各センサ 14, 15, 19~23, 51 f, 51 r は、それらの出力を演算処理装置 16 に入力すべく、図示を省略する信号線を介して演算処理装置 16 に接続されている。また、本発明の床反力作用点推定方法に対応させていえば、MP 直下接地センサ 51 f、足首直下接地センサ 51 r は、それぞれ第 2 接地センサ、第 1 接地センサに相当するものである。さらに、本発明の関節モーメント推定方法に対応させていえば、センサ 14, 15, 19、20 は、二足歩行移動体としての人間 1 の上体の傾斜角度を検出するための上体傾斜センサとしての意味をもち、センサ 20, 21 は、人間 1 (二足歩行移動体) の所定部位としての腰部 3 の加速度を検出するためのセンサとしての意味をもつ。

#### 【0054】

また、図 2 中、括弧付きの参照符号 24 を付して示したものは、各脚体 2 の足首関節 12 の屈曲角度に応じた信号を出力する足首関節角度センサであるが、こ



れは、後述する第2実施形態に係わるものである。そして、本実施形態（第1実施形態）では、足首関節角度センサ24は不要であり、実際には備えられていない。

#### 【0055】

前記演算処理装置16は、図3に示すような機能的手段を備えている。すなわち、演算処理装置16は、前記接地センサ51r、51fの検出データを用いて、人間1の脚体2、2の運動状態が単脚支持状態（図1（a）の状態）であるか、両脚支持状態（図1（b）の状態）であるかを判断する脚体運動判断手段25を備えている。また、演算処理装置16は、胸部前後加速度センサ15及び胸部ジャイロセンサ14の検出データを用いて、胸部4の絶対座標系Cfにおける傾斜角度 $\theta a$ （具体的には鉛直方向に対する傾斜角度 $\theta a$ 。図2参照）を計測する胸部傾斜角度計測手段26と、腰部前後加速度センサ20及び腰部ジャイロセンサ19の検出データを用いて、腰部3の絶対座標系Cfにおける傾斜角度 $\theta b$ （具体的には鉛直方向に対する傾斜角度 $\theta b$ 。図2参照）を計測する腰部傾斜角度計測手段27とを備えている。

#### 【0056】

さらに、演算処理装置16は、腰部前後加速度センサ20及び腰部上下加速度センサ21の検出データと前記腰部傾斜角度計測手段26により計測された腰部3の傾斜角度 $\theta b$ のデータとを用いて、本実施形態における人間1の基準点として図2に示すように腰部3に設定される身体座標系Cp（図2のx-z座標系）の原点Oの絶対座標系Cfにおける加速度（並進加速度） $a_0 = T(a_{0x}, a_{0z})$ を求める基準加速度計測手段28を備えている。ここで、身体座標系Cpは、より詳しくは、例えば人間1の左右の股関節8、8のそれぞれの中心を結ぶ線の中点を原点Oとし、鉛直方向をz軸方向、人間1の前方に向かう水平方向をx軸方向とした座標系であり、3軸の方向は前記絶対座標系Cfと同一である。

#### 【0057】

また、演算処理装置16は、各脚体2の股関節角度センサ22及び膝関節角度センサ23の検出データと、前記腰部傾斜角度計測手段27による腰部3の傾斜角度 $\theta b$ のデータとを用いて、絶対座標系Cfにおける各脚体2の大腿部9及び下

腿部 11 のそれぞれの傾斜角度  $\theta_c$ ,  $\theta_d$  (具体的には鉛直方向に対する傾斜角度  $\theta_c$ ,  $\theta_d$ 。図 2 参照) 求める脚体姿勢算出手段 29 を備えている。

#### 【0058】

また、演算処理装置 16 は、前記胸部傾斜角度計測手段 26、腰部傾斜角度計測手段 27 及び脚体姿勢算出手段 29 により得られる胸部 4 の傾斜角度  $\theta_a$ 、腰部 3 の傾斜角度  $\theta_b$ 、並びに各脚体 2 の大腿部 9 の傾斜角度  $\theta_c$  及び下腿部 11 の傾斜角度  $\theta_d$  のデータを用いて、後述の剛体リンクモデルに対応する人間 1 の各剛体相当部の重心の位置 (詳しくは前記身体座標系  $C_p$  における各剛体相当部の重心の位置) を求める各部重心位置算出手段 30 と、その各剛体相当部の重心の位置のデータを用いて、上記身体座標系  $C_p$  における人間 1 の全体の重心の位置を求める身体重心位置算出手段 31 と、前記脚体姿勢算出手段 29 による各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 11 のそれぞれの傾斜角度  $\theta_c$ ,  $\theta_d$  のデータを用いて各脚体 2 の足首関節 12 の身体座標系  $C_p$  における位置を求めると共に、さらに身体重心位置算出手段 31 による人間 1 の全体の重心  $G_0$  (図 1 参照。以下、身体重心  $G_0$  という) の位置のデータを用いて該脚体 2 の足首関節 12 の身体重心  $G_0$  に対する位置 (詳しくは、前記式 (5) における  $\Delta X_f$ ,  $\Delta Z_f$ ,  $\Delta X_r$ ,  $\Delta Z_r$ ) を求める足首位置算出手段 31 と、足首位置算出手段 31 により得られた足首関節 12 の位置 (身体座標系  $C_p$  における位置) のデータを用いて各脚体 2 の足平部 13 の MP 関節 13a の身体座標系  $C_p$  における位置 (詳しくは  $x$  軸方向位置) を求める MP 位置算出手段 33 と、前記身体重心位置算出手段 31 により得られた身体重心  $G_0$  の位置のデータと前記基準加速度計測手段 28 により得られた身体座標系  $C_p$  の原点  $O$  の加速度  $a_0$  のデータとを用いて絶対座標系  $C_f$  における身体重心  $G_0$  の加速度  $a = T(a_x, a_z)$  (図 1 参照) を求める身体重心加速度算出手段 34 とを備えている。

#### 【0059】

さらに、演算処理装置 16 は、前記各部重心位置算出手段 30 により得られた人間 1 の各剛体相当部の重心の位置 (詳しくは脚体 2 に係わる剛体相当部の重心の位置) のデータと前記基準加速度計測手段 28 により得られた身体座標系  $C_p$  の原点  $O$  の加速度  $a_0$  のデータとを用いて絶対座標系  $C_f$  における各脚体 2 の大腿

部 9 及び下腿部 11 のそれぞれの重心の加速度（並進加速度）を求める脚体各部加速度算出手段 35 と、前記脚体姿勢算出手段 29 により得られた各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 11 のそれぞれの傾斜角度  $\theta_c$ ,  $\theta_d$  のデータを用いて絶対座標系  $C_f$  における各脚体 2, 2 の大腿部 9 及び下腿部 11 の角加速度を求める脚体各部角加速度算出手段 36 と、前記身体重心位置算出手段 31、足首位置算出手段 32 および MP 位置算出手段 33 でそれぞれ求めた身体重心  $G_0$ 、足首関節 12 及び MP 関節 13a の位置（身体座標系  $C_p$  での位置）、並びに各脚体 2 の接地センサ 51f, 51r の検出出力に基づいて接地している各脚体 2 の床反力作用点の位置を推定する床反力作用点推定手段 38 とを備えている。

#### 【0060】

また、演算処理装置 16 は、前記身体重心加速度算出手段 34 により求めた身体重心の加速度  $a$  のデータと前記足首位置算出手段 32 により求めた各脚体 2 の足首関節 12 の身体重心  $G_0$  に対する位置のデータと前記脚体運動判断手段 25 による脚体 2 の運動状態の判断結果のデータとを用いて各脚体 2 に作用する床反力の推定値を求める床反力推定手段 39 と、この床反力の推定値のデータと脚体各部加速度算出手段 35 による各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 11 の重心の加速度のデータと脚体各部角加速度算出手段 36 による各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 11 の角加速度のデータと床反力作用点推定手段 38 による床反力作用点の推定位置のデータと前記脚体姿勢算出手段 29 による各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 11 のそれぞれの傾斜角度  $\theta_c$ ,  $\theta_d$  のデータとを用いて各脚体 2 の膝関節 10 及び股関節 8 にそれぞれ作用するモーメントを推定する関節モーメント推定手段 40 とを備えている。

#### 【0061】

次に、上述の演算処理装置 16 の各手段のより詳細な処理内容と併せて、本実施形態の作動を説明する。

#### 【0062】

本実施形態では、例えば人間 1 が歩行等の脚体 2 の運動を行うに際して、両脚体 2, 2 を着床させた状態（両足平部 13, 13 を接地させた状態）で演算処理装置 16 の図示しない電源スイッチを投入すると、該演算処理装置 16 による処

理が所定のサイクルタイム毎に以下に説明するように逐次実行され、各脚体 2 に作用する床反力の推定値等が逐次求められる。

#### 【0063】

すなわち、まず、演算処理装置 16 は、前記脚体運動判断手段 25 の処理を実行する。この脚体運動判断手段 25 の処理では、前記サイクルタイム毎に、各脚体 2 の接地センサ 51 f, 51 r の ON/OFF が判断される。そして、一方の脚体 2 の接地センサ 51 f, 51 r のうちの少なくとも一つが ON 信号を出力する（いずれかの接地センサ 51 f, 51 r の箇所が接地している）と共に、他方の脚体 2 の接地センサ 51 f, 51 r のうちの少なくともいずれか一つが ON 信号を出力している場合には、人間 1 の脚体 2, 2 の運動状態は、前記図 1 (b) に示したような両脚支持状態であると判断される。また、一方の脚体 2 の接地センサ 51 f, 51 r のうちの少なくとも一つが ON 信号を出力すると共に、他方の脚体 2 の接地センサ 51 f, 51 r のいずれもが ON 信号を出力していない（接地センサ 51 f, 51 r の両者の箇所が接地していない）場合には、人間 1 の脚体 2, 2 の運動状態は、前記図 1 (a) に示したような単脚支持状態であると判断される。

#### 【0064】

なお、単脚支持状態であるか両脚支持状態であるかの判断は、上記のように接地センサ 51 f, 51 r の検出信号だけで判断してもよいが、単脚支持状態と両脚支持状態との間の移行時においては、さらに、腰部上下加速度センサ 21 の検出出力の変化等を考慮して判断するようにしてもよい。

#### 【0065】

上述のような脚体運動判断手段 25 の処理と並行して、演算処理装置 16 は、前記胸部傾斜角度計測手段 26 及び腰部傾斜角度計測手段 27 による処理を実行する。この場合、胸部傾斜角度計測手段 26 の処理では、胸部前後加速度センサ 15 及び胸部ジャイロセンサ 14 からそれぞれ入力される胸部 4 の前後方向の加速度、胸部 4 の角速度の検出データから、所謂カルマンフィルタの処理を用いた公知の手法により、絶対座標系 Cf における胸部 4 の傾斜角度  $\theta a$  が前記サイクルタイム毎に逐次求められる。同様に、腰部傾斜角度計測手段 27 の処理では、腰

部前後加速度センサ 20 及び腰部ジャイロセンサ 19 からそれぞれ入力される腰部 3 の前後方向の加速度、腰部 3 の角速度の検出データから、カルマンフィルタの処理を用いて絶対座標系 Cf における腰部 3 の傾斜角度  $\theta b$  が逐次求められる。ここで、絶対座標系 Cf における胸部 4 及び腰部 3 のそれぞれの傾斜角度  $\theta a$ ,  $\theta b$  は、本実施形態では例えば鉛直方向（重力方向）に対する傾斜角度である。

#### 【0066】

尚、例えばジャイロセンサ 14, 19 による角速度の検出データを積分することで、胸部 4 や腰部 3 の傾斜角度を求めることも可能であるが、本実施形態のようにカルマンフィルタの処理を用いることで、胸部 4 や腰部 3 の傾斜角度  $\theta a$ ,  $\theta b$  を精度よく計測することができる。

#### 【0067】

次に、演算処理装置 16 は、前記脚体姿勢算出手段 29 の処理と前記基準加速度計測手段 28 の処理とを実行する。

#### 【0068】

前記脚体姿勢算出手段 29 による処理では、各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 11 の傾斜角度  $\theta c$ ,  $\theta d$ （鉛直方向に対する傾斜角度。図 2 参照）が前記サイクルタイム毎に次のように求められる。すなわち、各脚体 2 の大腿部 9 の傾斜角度  $\theta c$  は、その脚体 2 に装着されている前記股関節角度センサ 22 による股関節 8 の屈曲角度  $\Delta \theta c$  の検出データの今回値と、前記腰部傾斜角度計測手段 27 により求められた腰部 3 の傾斜角度  $\theta b$  の今回値とから次式（6）により算出される。

#### 【0069】

$$\theta c = \theta b + \Delta \theta c \quad \cdots \cdots (6)$$

ここで、腰部 3 の傾斜角度  $\theta b$  は、該腰部 3 の上端部が下端部よりも人間 1 の前方側に突き出るように該腰部 3 が鉛直方向に対して傾斜している場合に負の値となるものであり、股関節 8 の屈曲角度  $\Delta \theta c$  は、大腿部 9 の下端部が人間 1 の前方側に突き出るように大腿部 9 が腰部 3 の軸心に対して傾斜している場合に正の値となるものである。

#### 【0070】

さらに、各脚体 2 の下腿部 11 の傾斜角度  $\theta d$  は、上記のように求められた大

腿部 9 の傾斜角度  $\theta_c$  の今回値と、該脚体 2 に装着されている前記膝関節角度センサ 23 による膝関節 10 の屈曲角度  $\Delta \theta_d$  の検出データの今回値とから次式 (7) により算出される。

【0071】

$$\theta_d = \theta_c - \Delta \theta_d \quad \dots\dots (7)$$

ここで、膝関節 10 の屈曲角度は、下腿部 11 が大腿部 9 の軸心に対して該大腿部 9 の背面側に傾斜している場合に正の値となるものである。

【0072】

また、前記基準加速度計測手段 28 の処理では、前記身体座標系  $C_p$  の原点  $O$  の絶対座標系  $C_f$  における加速度  $a_0 = T(a_{0x}, a_{0z})$  が次のように求められる。すなわち、前記腰部前後加速度センサ 20 による腰部 3 の前後方向の加速度の検出データの今回値を  $a_p$ 、前記腰部上下加速度センサ 21 による腰部 3 の上下方向の加速度の検出データの今回値を  $a_q$  とすると、それらの検出データ  $a_p$ ,  $a_q$  と、前記腰部傾斜角度計測手段 25 により求められた腰部 3 の傾斜角度  $\theta_b$  の今回値とから、次式 (8) により絶対座標系  $C_f$  における加速度  $a_0 = T(a_{0x}, a_{0z})$  が求められる。

【0073】

$$\begin{aligned} a_0 &= T(a_{0x}, a_{0z}) \\ &= T(a_p \cdot \cos \theta_b - a_q \cdot \sin \theta_b, a_p \cdot \sin \theta_b + a_q \cdot \cos \theta_b - g) \\ &\quad \dots\dots (8) \end{aligned}$$

次に、演算処理装置 16 は、前記各部重心位置算出手段 30 の処理を実行し、以下に説明する剛体リンクモデルを用いて、前記身体座標系  $C_p$  における人間 1 の各剛体相当部の重心の位置（身体座標系  $C_p$  の原点に対する位置）を求める。

【0074】

図 4 に示すように、本実施形態で用いる剛体リンクモデル  $R$  は、人間 1 を、各脚体 2 の大腿部 9 に相当する剛体  $R_1$ ,  $R_1$  と、下腿部 11 に相当する剛体  $R_2$ ,  $R_2$  と、腰部 3 に相当する剛体  $R_3$  と、前記胸部 4、腕体 7, 7 及び頭部 6 を合わせた部分 38（以下、上体部 38 という）に相当する剛体  $R_4$  とを連結してなるものとして表現するモデルである。この場合、各剛体  $R_1$  と剛体  $R_3$  との連結部、並びに、各

剛体R1と剛体R2との連結部がそれぞれ股関節8、膝関節10に相当する。また、剛体R3と剛体R4との連結部は腰部3に対する胸部4の傾動支点部39である。

#### 【0075】

そして、本実施形態では、このような剛体リンクモデルRの各剛体R1~R4に対応する人間1の剛体相当部（各脚体2の大腿部9及び下腿部11、腰部3、上体部38）のそれぞれの重心G1、G2、G3、G4の各剛体相当部における位置があらかじめ求められ、演算処理装置16の図示しないメモリに記憶されている。

#### 【0076】

ここで、演算処理装置16に記憶保持している各剛体相当部の重心G1、G2、G3、G4の位置は、各剛体相当部に対して固定した座標系での位置である。この場合、各剛体相当部の重心G1、G2、G3、G4の位置を表すデータとして、例えば、各剛体相当部の一端部の関節の中心点から該剛体相当部の軸心方向の距離が用いられる。具体的には、例えば図4に示すように、各大腿部9の重心G1の位置は、該大腿部9の股関節8の中心から大腿部9の軸心方向に距離 $t_1$ の位置、各下腿部11の重心G2の位置は、該下腿部11の膝関節10の中心から下腿部11の軸心方向に距離 $t_2$ の位置として表され、それらの距離 $t_1$ 、 $t_2$ の値があらかじめ求められて演算処理装置16に記憶保持されている。他の剛体相当部の重心G3、G4の位置についても同様である。

#### 【0077】

尚、上体部38の重心G4の位置は、厳密には、該上体部38に含まれる腕体7、7の動きの影響を受けるが、歩行時における各腕体7、7は、一般に胸部4の軸心に対して対称的な位置関係になるので、上体部38の重心G4の位置はさほど変動せず、例えば直立停止状態における上体部38の重心G4の位置とほぼ同一となる。

#### 【0078】

また、本実施形態では、各剛体相当部（各脚体2の大腿部9及び下腿部11、腰部3、上体部38）の重心G1、G2、G3、G4の位置を表すデータの他、各剛体相当部の重量のデータや、各剛体相当部のサイズのデータ（例えば各剛体相当部の長さのデータ）があらかじめ求められて、演算処理装置16に記憶保持されてい

る。

#### 【0079】

尚、下腿部 11 の重量は、足平部 13 を含めた重量である。また、上述のように演算処理装置 16 にあらかじめ記憶保持したデータは、実測等により求めておいてもよいが、人間 1 の身長や体重から、人間の平均的な統計データに基づいて推測するようにしてもよい。一般に、上記各剛体相当部の重心  $G1$ 、 $G2$ 、 $G3$ 、 $G4$  の位置や、重量、サイズは、人間の身長や体重と相関性があり、その相関関係に基づいて、人間の身長及び体重のデータから、上記各剛体相当部の重心  $G1$ 、 $G2$ 、 $G3$ 、 $G4$  の位置や、重量、サイズを比較的精度よく推測することが可能である。

#### 【0080】

前記各部重心位置算出手段 30 は、上述のように演算処理装置 16 にあらかじめ記憶保持したデータと、前記胸部傾斜角度計測手段 26 及び腰部傾斜角度計測手段 27 によりそれぞれ求められた胸部 4 の傾斜角度  $\theta a$  (=上体部 38 の傾斜角度) 及び腰部 3 の傾斜角度  $\theta b$  の今回値と、前記脚体姿勢算出手段 29 により求められた各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 11 のそれぞれの傾斜角度  $\theta c$ 、 $\theta d$  の今回値とから、腰部 3 に固定された原点  $O$  を有する身体座標系  $Cp$  (図 4 の  $xz$  座標系) での各剛体相当部の重心  $G1$ 、 $G2$ 、 $G3$ 、 $G4$  の位置を求める。

#### 【0081】

この場合、各剛体相当部 (各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 11、腰部 3、上体部 38) の傾斜角度  $\theta a \sim \theta d$  が上述のように求められているので、その傾斜角度  $\theta a \sim \theta d$  のデータと、各剛体相当部のサイズのデータとから身体座標系  $Cp$  における各剛体相当部の位置及び姿勢が判る。従って、身体座標系  $Cp$  における各剛体相当部の重心  $G1$ 、 $G2$ 、 $G3$ 、 $G4$  の位置が求められることとなる。

#### 【0082】

具体的には、例えば図 4 を参照して、同図 4 の左側に位置する脚体 2 に関し、大腿部 9 の身体座標系  $Cp$  における傾斜角度 ( $z$  軸方向に対する傾斜角度) は  $\theta c$  (この場合、図 4 では  $\theta c < 0$  である) であるので、身体座標系  $Cp$  における大腿部 9 の重心  $G1$  の位置の座標は、 $(t1 \cdot \sin \theta c, -t1 \cdot \cos \theta c)$  となる。また、下腿部 11 の身体座標系  $Cp$  における傾斜角度は  $\theta d$  (図 4 では  $\theta d < 0$ ) であるの



で、身体座標系  $C_p$  における下腿部 11 の重心  $G_2$  の位置の座標は、大腿部 9 の長さを  $L_c$  とすると、 $(L_c \cdot \sin \theta_c + t_2 \cdot \sin \theta_d, -L_c \cdot \cos \theta_c - t_2 \cdot \cos \theta_d)$  となる。他の脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 11 並びに、腰部 3 及び上体部 38 の重心についても上記と同様に求められる。

#### 【0083】

このようにして、各部重心位置算出手段 30 により、身体座標系  $C_p$  における各剛体相当部の重心  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$  の位置を求めた後、演算処理装置 16 は、前記身体重心位置算出手段 31 の処理実行し、各剛体相当部の重心  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$  の位置のデータと、各剛体相当部の重量のデータとを用いて身体座標系  $C_p$  における人間 1 の身体重心  $G_0$  の位置  $(x_g, z_g)$  を求める。

#### 【0084】

ここで、身体座標系  $C_p$  における腰部 3 の重心  $G_3$  の位置及び重量をそれぞれ  $(x_3, z_3)$ 、 $m_3$ 、上体部 38 の重心  $G_4$  の位置及び重量をそれぞれ  $(x_4, z_4)$ 、 $m_4$ 、人間 1 の前方に向かって左側の脚体 2 の大腿部 9 の重心  $G_1$  の位置及び重量をそれぞれ  $(x_{1L}, z_{1L})$ 、 $m_{1L}$ 、同脚体 2 の下腿部 11 の重心  $G_2$  の位置及び重量をそれぞれ  $(x_{2L}, z_{2L})$ 、 $m_{2L}$ 、右側の脚体 2 の大腿部 9 の重心  $G_1$  の位置及び重量をそれぞれ  $(x_{1R}, z_{1R})$ 、 $m_{1R}$ 、同脚体 2 の下腿部 11 の重心  $G_2$  の位置及び重量をそれぞれ  $(x_{2R}, z_{2R})$ 、 $m_{2R}$ 、人間 1 の体重を  $M (=m_{1L}+m_{2L}+m_{1R}+m_{2R}+m_3+m_4)$  とすると、身体座標系  $C_p$  における人間 1 の身体重心  $G_0$  の位置  $(x_g, z_g)$  は次式 (9) により求められる。

#### 【0085】

$$\begin{aligned} x_g &= (m_{1L} \cdot x_{1L} + m_{1R} \cdot x_{1R} + m_{2L} \cdot x_{2L} + m_{2R} \cdot x_{2R} \\ &\quad + m_3 \cdot x_3 + m_4 \cdot x_4) / M \\ z_g &= (m_{1L} \cdot z_{1L} + m_{1R} \cdot z_{1R} + m_{2L} \cdot z_{2L} + m_{2R} \cdot z_{2R} \\ &\quad + m_3 \cdot z_3 + m_4 \cdot z_4) / M \end{aligned} \quad \dots\dots (9)$$

このようにして身体重心位置算出手段 31 の処理を実行した後、さらに、演算処理装置 16 は、前記身体重心加速度算出手段 34 の処理と、前記足首位置算出手段 32 の処理と、MP 位置算出手段 33 の処理とを実行する。

#### 【0086】

この場合、身体重心加速度算出手段 34 の処理では、まず、前記サイクルタイム毎に身体重心位置算出手段 31 により求められる身体座標系  $C_p$  における身体重心  $G_0$  の位置  $(x_g, z_g)$  の時系列データを用いて、身体座標系  $C_p$  における身体重心  $G_0$  の位置  $(x_g, z_g)$  の 2 階微分値、すなわち、身体座標系  $C_p$  の原点  $O$  に対する身体重心  $G_0$  の加速度  $T(d^2x_g/dt^2, d^2z_g/dt^2)$  が求められる。そして、この加速度  $T(d^2x_g/dt^2, d^2z_g/dt^2)$  と、前記基準加速度計測手段 28 により求められた身体座標系  $C_p$  の原点  $O$  の絶対座標系  $C_f$  における加速度  $a_0 = T(a_{0x}, a_{0z})$  とのベクトル和を求めることにより、絶対座標系  $C_f$  における身体重心  $G_0$  の加速度  $a = T(a_x, a_z)$  が求められる。

#### 【0087】

また、前記足首位置算出手段 32 の処理では、まず、前記脚体姿勢算出手段 29 により求められた各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 11 のそれぞれの傾斜角度  $\theta_c$ 、 $\theta_d$  のデータの今回値と、前記腰部傾斜角度計測手段 27 により求められた腰部 3 の傾斜角度  $\theta_b$  のデータの今回値と、該大腿部 9 及び下腿部 11 のサイズ（長さ）のデータとから、前記各部重心位置算出手段 30 の処理と同様の処理によって、前記身体座標系  $C_p$  における各脚体 2 の足首関節 12 の位置が求められる。具体的には、図 4 を参照して、同図 4 の左側に位置する脚体 2 に関し、下腿部 11 の長さ（膝関節 10 の中心から足首関節 12 の中心までの長さ）を  $L_d$  とすると、身体座標系  $C_p$  における足首関節 12 の位置の座標  $(x_{12}, z_{12})$  は、 $(L_c \cdot \sin \theta_c + L_d \cdot \sin \theta_d, -L_c \cdot \cos \theta_c - L_d \cdot \cos \theta_d)$  となる（但し、図 4 では  $\theta_c < 0$ 、 $\theta_d < 0$ ）。他方の脚体 2 についても同様である。

#### 【0088】

そして、この足首関節 12 の身体座標系  $C_p$  における位置  $(x_{12}, z_{12})$  と前記身体重心位置算出手段 31 により求められた身体座標系  $C_p$  における身体重心  $G_0$  の位置  $(x_g, z_g)$  のデータの今回値とから、身体重心  $G_0$  に対する各脚体 2 の足首部 12 の位置ベクトル  $T(x_{12} - x_g, z_{12} - z_g)$ 、すなわち、前記式 (5) における  $\Delta X_f$ 、 $\Delta Z_f$ 、 $\Delta X_r$ 、 $\Delta Z_r$  が求められる。

#### 【0089】

また、MP 位置算出手段 33 の処理では、次のように MP 関節 13a の位置（

詳しくは、身体座標系  $C_p$  における  $x$  軸方向の位置) が求められる。すなわち、図 5 を参照して、本実施形態では、人間 1 が水平な床 A 上で直立姿勢で起立して各脚体 2 の足平部 14 の底面のほぼ全面を床 A に接触させた状態 (以下、単に直立停止状態という) における足首関節 12 と MP 関節 13a との間の水平方向 ( $x$  軸方向) の距離  $\Delta x_{mp0}$  があらかじめ実測されて演算処理装置 16 に記憶保持されている。なお、この距離  $\Delta x_{mp0}$  は、各脚体 2 毎に各別に実測して記憶保持してもよいが、いずれか一方の脚体 2 について実測したものを両脚体 2, 2 で共用してもよい。

#### 【0090】

ここで、人間 1 の平地歩行等の運動中における足首関節 12 と MP 関節 13a との間の水平方向距離はそれぞれ、一般に、人間 1 の直立停止状態における上記距離  $\Delta x_{mp0}$  に概略的には等しい。そこで、本実施形態では、MP 関節 13a の位置 ( $x$  軸方向の位置) は、足首関節 12 から  $x$  軸方向に上記距離  $\Delta x_{mp0}$  だけ離れた位置として求められる。具体的には、足首位置算出手段 32 により得られた足首関節 12 の身体座標系  $C_p$  における位置 ( $x_{12}$ ,  $z_{12}$ ) の今回値の  $x$  軸座標成分に、距離  $\Delta x_{mp0}$  を加えたものが身体座標系  $C_p$  における MP 関節 13a の  $x$  軸方向位置として求められる。

#### 【0091】

次に、演算処理装置 16 は、前記床反力作用点推定手段 38 の処理と前記床反力推定手段 39 の処理とを実行する。床反力作用点推定手段 38 の処理では、次のように接地している各脚体 2 に係わる床反力作用点 (足平部 13 の接地箇所に作用する全床反力が集中するとみなせる点) が推定される。すなわち、まず、各脚体 2 の接地センサ 51f, 51r の検出信号が判断され、いずれかの接地センサ 51f, 51r が ON 信号を出力している場合には、その脚体 2 が接地していると判断する。そして、その接地している各脚体 2 について、該脚体 2 の接地センサ 51f, 51r の ON/OFF の組合わせと、該脚体 2 の足首関節 12 および MP 関節、並びに身体重心 G0 の相対的位置関係 (詳しくは  $x$  軸方向の相対的位置関係) に応じて床反力作用点の  $x$  軸方向位置 (人間 1 の進行方向での水平方向位置) が決定される。

## 【0092】

さらに詳細には、図6(a)を参照して、足首直下接地センサ51rがON信号を出力すると共に、MP直下接地センサ51fがOFFになっている場合には、足首関節12の鉛直方向直下に床反力作用点が存在するとして、その足首関節12のx軸方向位置が床反力作用点のx軸方向位置(人間1の進行方向での水平方向位置)として決定される。すなわち、上記のように足首直下接地センサ51rおよびMP直下接地センサ51fがそれぞれON、OFFになっているような状態は、該接地センサ51r, 51fを備えた脚体2の足平部13がその踵寄りの箇所で床Aに接地しているような状態であり、このような状態では、その脚体2の床反力作用点は、足首関節12のほぼ直下(鉛直下方)の位置にある。そこで、足首直下接地センサ51rおよびMP直下接地センサ51fがそれぞれON、OFFになっている場合には、上記の如く接地している脚体2の床反力作用点のx軸方向位置を決定する。なお、図6(a)では接地している1つの脚体2のみを模式的に図示しており、他方の脚体は図示を省略している。このことは以下に説明する図6(b)並びに図7(a)～(c)においても同様である。

## 【0093】

また、図6(b)を参照して、足首直下接地センサ51rがOFFになっていると共に、MP直下接地センサ51fがON信号を出力している場合には、MP関節13aの鉛直方向直下に床反力作用点が存在するとして、そのMP関節13aのx軸方向位置が床反力作用点のx軸方向位置として決定される。すなわち、足首直下接地センサ51rおよびMP直下接地センサ51fがそれぞれOFF、ONになっているような状態は、該接地センサ51r, 51fを備えた脚体2の足平部13がそのつま先寄りの箇所で床Aに接地しているような状態であり、このような状態では、その脚体2の床反力作用点は、MP関節13aのほぼ直下(鉛直方向下方)の位置にある。そこで、足首直下接地センサ51rおよびMP直下接地センサ51fがそれぞれOFF、ONになっている場合には、上記の如く接地している脚体2の床反力作用点のx軸方向位置を決定する。

## 【0094】

なお、図6(a), (b)にそれぞれ対応する接地センサ51r, 51fのO

N/OFFの組合わせの場合（接地センサ 51r, 51f のいずれか一方のみが ON になっている場合）における床反力作用点の x 軸方向位置の推定の仕方は、身体重心 G0、足首関節 12 および MP 関節 13a の相互の位置関係には依存しない。

#### 【0095】

一方、足首直下接地センサ 51r および MP 直下接地センサ 51f の両者が ON 信号を出力している場合には、さらに身体重心 G0、足首関節 12 および MP 関節 13a の相対的位置関係（詳しくは、身体座標系 Cp の x 軸方向における相対的位置関係）に応じて床反力作用点の x 軸方向位置が推定される。さらに詳細には、図 7（a）に示すように、身体重心 G0 が足首関節 12 よりも後側に在るときには、その足首関節 12 の鉛直方向直下に床反力作用点が存在するとして、その足首関節 12 の x 軸方向位置が床反力作用点の x 軸方向位置として決定される。すなわち、接地している脚体 2 の足首関節 12 が身体重心 G0 よりも前側にある状態では、該脚体 2 に係る床反力は足平部 13 の踵寄りの箇所に集中しており、このような状態では、その脚体 2 の床反力作用点は、足首関節 12 のほぼ直下の位置にある。そこで、図 7（a）の如く足首関節 12 が身体重心 G0 よりも前側にある状態では、上記の如く接地している脚体 2 の床反力作用点の x 軸方向位置を決定する。

#### 【0096】

また、図 7（b）に示すように、x 軸方向で身体重心 G0 が MP 関節 13a と足首関節 12 との間に在るときには、身体重心 G0 の鉛直方向直下に床反力作用点が存在するとして、その身体重心 G0 の x 軸方向位置が床反力作用点の x 軸方向位置として決定される。すなわち、x 軸方向における身体重心 G0 の位置が接地している脚体 2 の MP 関節 13a と足首関節 12 との間に在る状態では、該脚体 2 に係る床反力は、身体重心 G0 の鉛直下方付近に集中する。そこで、図 7（b）の如く x 軸方向における身体重心 G0 の位置が接地している脚体 2 の MP 関節 13a と足首関節 12 との間に在る状態では、上記の如く接地している脚体 2 の床反力作用点の x 軸方向位置を決定する。

#### 【0097】

また、図 7 (c) に示すように、身体重心G0がMP 関節 13 a よりも前側に在るときには、そのMP 関節 13 a の鉛直方向直下に床反力作用点が存在するとして、そのMP 関節 13 a の x 軸方向位置が床反力作用点の x 軸方向位置として決定される。すなわち、接地している脚体 2 のMP 関節 13 a が身体重心G0よりも後側にある状態では、該脚体 2 に係る床反力は足平部 13 のつま先寄りの箇所に集中しており、このような状態では、その脚体 2 の床反力作用点は、MP 関節 13 a のほぼ直下の位置にある。そこで、図 7 (c) の如くMP 関節 13 a が身体重心G0よりも後側にある状態では、上記の如く接地している脚体 2 の床反力作用点の x 軸方向位置を決定する。

#### 【0098】

以上説明した床反力作用点推定手段 38 の処理により、接地している各脚体 2 の床反力作用点の x 軸方向位置が推定される。なお、両接地センサ 51 r, 51 f のON、OFFの組合わせと、身体重心G0、足首関節 12 およびMP 関節 13 a の相対的位置関係と、上記した床反力作用点の x 軸方向位置との関係は、人間 1 が平地を歩行しているような場合はもちろん、例えば人間 1 が椅子に座ったり、椅子から立ち上がる動作を行なっている場合、さらには、人間 1 が階段もしくは坂道での歩行を行っている場合にも概ね成立するものである。

#### 【0099】

床反力作用点推定手段 38 の処理では、さらに接地している各脚体 2 の床反力作用点の鉛直方向位置 (z 軸方向位置) が次のように決定される。すなわち、まず、接地している各脚体 2 について、該脚体 2 の足首関節 12 と接地面 (床A) との距離が把握される。この場合、本実施形態では、あらかじめ演算処理装置 16 に記憶保持された値が、足首関節 12 と接地面 (床A) との距離 (以下、足首関節・接地面間距離という) として把握される。さらに詳細には、前記図 5 を参照して、人間 1 の前記直立停止状態における足首関節 12 の中心から床A面 (接地面) までの距離  $H_a$  (以下、足首関節基準高さ  $H_a$  という) があらかじめ実測されて、演算処理装置 16 に記憶保持されている。なお、足首関節基準高さ  $H_a$  は、各脚体 2 毎に各別に実測して記憶保持するようにしてもよいが、いずれか一方の脚体 2 についてのみ、実測して記憶保持し、それを両脚体 2 で共用してもよ

い。そして、上記記憶保持した足首関節基準高さ  $H_a$  が、足首関節・接地面間距離として把握される。

#### 【0100】

上記のようにして、足首関節・接地面間距離を把握した後、床反力作用点の鉛直方向位置（ $z$  軸方向位置）は、この把握した足首・接地面間距離だけ、足首関節 12 の位置から鉛直下方に離れた位置として決定される。すなわち、床反力作用点の鉛直方向位置（身体座標系  $C_p$  における位置）は、前記運動形態判断手段 37 が判断した人間 1 の運動形態がいずれの運動形態であっても、足首関節 12 の位置の  $z$  軸成分値から、上記の如く把握した足首関節・接地面間距離を減じた値（但し、上向きを  $z$  軸の正方向とする）として決定される。

#### 【0101】

なお、本実施形態では、後述する関節モーメント推定手段 40 による関節モーメントの算出を行うために、上記の如く決定した床反力作用点の身体座標系  $C_p$  における位置（ $xz$  座標成分）は、さらに足首位置算出手段 32 で算出された、身体座標系  $C_p$  における足首関節 12 の位置を基準とした位置に変換される。すなわち、床反力作用点の推定位置は、足首関節 12 の位置を基準とした位置ベクトル（以下、床反力作用点ベクトルという）に変換されて求められる。

#### 【0102】

以上説明した床反力作用点推定手段 38 の処理によって、接地している各脚体 2 について、その足首関節 12 を基準とした床反力作用点ベクトル（ $x$  軸方向及び  $z$  軸方向の位置）が推定される。

#### 【0103】

前記床反力推定手段 39 の処理では、前記脚体運動判断手段 25 により今回のサイクルタイムで判断された脚体 2 の運動状態が単脚支持状態である場合には、人間 1 の体重  $M$  及び重力加速度  $g$  の値（これらはあらかじめ演算処理装置 16 に記憶されている）と、前記身体重心加速度算出手段 34 により求められた絶対座標系  $C_f$  における身体重心  $G_0$  の加速度  $a = {}^T(a_x, a_z)$  の今回値とから、前記式（

2) により、接地している脚体 2 に作用する床反力  $F = T(F_x, F_z)$  の推定値が求められる。尚、この場合、非接地側の脚体 2 (遊脚側の脚体 2) に作用する床反力は、 $T(0, 0)$  である。

#### 【0104】

また、脚体運動判断手段 25 により今回のサイクルタイムで判断された脚体 2 の運動状態が両脚支持状態である場合には、人間 1 の体重  $M$  及び重力加速度  $g$  と、前記身体重心加速度算出手段 34 により求められた絶対座標系  $C_f$  における身体重心  $G_0$  の加速度  $a = T(a_x, a_z)$  の今回値と、前記足首位置算出手段 32 により求められた各脚体 2 の足首関節 12 の身体重心  $G_0$  に対する位置の今回値のデータ (式 (5) の  $\Delta X_f, \Delta Z_f, \Delta X_r, \Delta Z_r$  のデータの今回値) とから、前記式 (5) により、各脚体 2 毎の床反力  $F_f = T(F_{fx}, F_{fz})$ 、 $F_r = T(F_{rx}, F_{rz})$  の推定値が求められる。

#### 【0105】

一方、演算処理装置 16 は、上述のような身体重心位置算出手段 31、身体重心加速度算出手段 34、足首位置算出手段 32、MP 位置算出手段 33、床反力作用点推定手段 38、及び床反力推定手段 39 の処理と並行して、前記脚体各部加速度算出手段 35 および脚体各部角加速度算出手段 36 の処理を実行する。

#### 【0106】

この場合、前記脚体各部加速度算出手段 35 の処理では、前記身体重心加速度算出手段 34 の処理と同様、まず、前記サイクルタイム毎に前記各部重心位置算出手段 30 により求められる身体座標系  $C_p$  における各脚体 2 の剛体相当部である大腿部 9 及び下腿部 11 の重心  $G_1, G_2$  の位置のそれぞれの時系列データを用いて、身体座標系  $C_p$  における大腿部 9 及び下腿部 11 の重心  $G_1, G_2$  の位置のそれぞれの 2 階微分値、すなわち、身体座標系  $C_p$  における大腿部 9 及び下腿部 11 の重心  $G_1, G_2$  のそれぞれの加速度 (身体座標系  $C_p$  の原点  $O$  に対する加速度) が求められる。そして、このそれぞれの加速度と、前記基準加速度計測手段 28 による腰部 3 の絶対座標系  $C_f$  における加速度  $a_0 = T(a_{0x}, a_{0z})$  とのベクトル和を求めることにより、絶対座標系  $C_f$  における大腿部 9 及び下腿部 11 のそれぞれの加速度 (より詳しくは、該加速度の絶対座標系  $C_f$  における座標成分) が求め



られる。

#### 【0107】

また、前記脚体各部角加速度算出手段36の処理では、前記サイクルタイム毎に前記脚体姿勢算出手段29により求められる各脚体2の大腿部9及び下腿部11のそれぞれの傾斜角度 $\theta_c$ 、 $\theta_d$ の時系列データを用いて、該大腿部9及び下腿部11のそれぞれの傾斜角度 $\theta_c$ 、 $\theta_d$ の2階微分値、すなわち、大腿部9及び下腿部11のそれぞれの角加速度が求められる。

#### 【0108】

次に、演算処理装置16は、前記関節モーメント推定手段40の処理を実行して、各脚体2の膝関節10及び股関節8に作用するモーメントを求める。この処理は、前記床反力推定手段39、脚体各部加速度算出手段35、脚体各部角加速度算出手段36、床反力作用点推定手段38、及び脚体姿勢算出手段29によりそれぞれ求められたデータの今回値を用いて、所謂逆動力学モデルに基づいて行われる。この逆動力学モデルは、人間1の各剛体相当部の並進運動に関する運動方程式と回転運動に関する運動方程式とを用いて、床反力作用点により近い関節から順番に該関節に作用するモーメントを求めるものであり、本実施形態では、各脚体2の膝関節10、股関節8に作用するモーメントが順番に求められる。

#### 【0109】

さらに詳細には、図8を参照して、まず、各脚体2の下腿部11に関し、下腿部11の先端部の足首関節12に作用する力（関節反力）、下腿部11の膝関節10の部分に作用する力（関節反力）、及び下腿部11の重心G2の並進加速度を、それぞれ絶対座標系Cfにおける成分表記によって、 $T(F_{1x}, F_{1z})$ 、 $T(F_{2x}, F_{2z})$ 、 $T(a_{2x}, a_{2z})$ とし、該下腿部11の重量を $m_2$ とする。このとき、下腿部11の重心G2の並進運動に関する運動方程式は、次式(10)となる。

#### 【0110】

$$T(m_2 \cdot a_{2x}, m_2 \cdot a_{2z}) = T(F_{1x} - F_{2x}, F_{1z} - F_{2z} - m_2 \cdot g)$$

$$\begin{aligned} \text{ゆえに、} T(F_{2x}, F_{2z}) &= T(F_{1x} - m_2 \cdot a_{2x}, F_{1z} - m_2 \cdot a_{2z} - m_2 \cdot g) \\ &\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ここで、下腿部11の重心G2の加速度 $T(a_{2x}, a_{2z})$ は、前記脚体各部加速度算

出手段 35 により求められるものである。また、下腿部 11 の先端部の足首関節 12 に作用する関節反力 $T(F_{1x}, F_{1z})$ は、近似的には、該下腿部 11 を有する脚体 2 について前記床反力推定手段 39 により求められる床反力の推定値に等しい。より詳しくは、単脚支持状態において、該脚体 2 が接地しているときには、関節反力 $T(F_{1x}, F_{1z})$ は、前記式 (2) により求められる床反力 $T(F_x, F_z)$ であり、該脚体 2 が遊脚側の脚体であるときには、 $T(F_{1x}, F_{1z})=T(0, 0)$ である。また、両脚支持状態において、該脚体 2 が人間 1 の進行方向前方に向かって後側の脚体であるときには、関節反力 $T(F_{1x}, F_{1z})$ は、前記式 (5) の床反力 $T(F_{rx}, F_{rz})$ であり、該脚体 2 が前側の脚体であるときには、前記式 (5) の床反力 $T(F_{fx}, F_{fz})$ である。

#### 【0111】

従って、各脚体 2 の膝関節 10 に作用する関節反力 $T(F_{2x}, F_{2z})$ は、脚体各部加速度算出手段 35 により求められた下腿部 11 の重心 G2 の加速度 $T(a_{2x}, a_{2z})$ のデータと、床反力推定手段 39 により求められる床反力 $(=T(F_{1x}, F_{1z}))$ のデータと、下腿部 11 のあらかじめ求められた重量 $m_2$ のデータと、重力加速度 $g$ の値とから、上記式 (10) により求められる。

#### 【0112】

また、図 8 を参照して、下腿部 11 の先端部の足首関節 12 に作用するモーメントを $M_1$ 、下腿部 11 の膝関節 10 の部分に作用するモーメントを $M_2$ 、下腿部 11 の重心 G2 の回りの慣性モーメントを $I_{G2}$ 、下腿部 11 の重心 G2 の回りの角加速度を $\alpha_2$ とする。また、前記図 4 に対応させて、下腿部 11 の重心 G2 と膝関節 10 の中心との間の距離を $t_2$ 、下腿部 11 の重心 G2 と足首部 12 との間の距離を $t_2'$  ( $=L_d - t_2$ ) とすると、下腿部 11 の重心 G2 の回りの回転運動に関する運動方程式は、次式 (11) となる。

#### 【0113】

$$I_{G2} \cdot \alpha_2 = M_1 - M_2 + F_{1x} \cdot t_2' \cdot \cos \theta d - F_{1z} \cdot t_2' \cdot \sin \theta d \\ + F_{2x} \cdot t_2 \cdot \cos \theta d - F_{2z} \cdot t_2 \cdot \sin \theta d$$

ゆえに

$$M_2 = M_1 - I_{G2} \cdot \alpha_2 + F_{1x} \cdot t_2' \cdot \cos \theta d - F_{1z} \cdot t_2' \cdot \sin \theta d$$

$$+F_{2x} \cdot t_2 \cdot \cos \theta d - F_{2z} \cdot t_2 \cdot \sin \theta d$$

$$\dots\dots (11)$$

ここで、式(13)中の $M_1$ は、同式(13)に係わる下腿部11を有する脚体2について前記床反力作用点推定手段38により前述の如く求められる床反力作用点ベクトルと、該脚体2について前記床反力推定手段39により求められる床反力ベクトルとの外積(ベクトル積)として得られるモーメントである。また、 $\alpha_2$ は、前記脚体各部角加速度算出手段36により求められる下腿部11の角加速度である。また、 $\theta d$ は前記脚体姿勢算出手段29により求められる下腿部11の傾斜角度である。また、 $T(F_{1x}, F_{1z})$ は、前述の通り、床反力推定手段39により求められる床反力の推定値である。さらに、 $T(F_{2x}, F_{2z})$ は、前記式(12)により求められるものである。また、慣性モーメント $I_{G2}$ は下腿部11の重量 $m_2$ やサイズのデータ等と共に、あらかじめ求められて演算処理装置16に記憶されるものである。

#### 【0114】

従って、膝関節10に作用するモーメント $M_2$ は、床反力推定手段39による床反力の推定値のデータと、床反力作用点推定手段38による床反力作用点ベクトルの推定値のデータと、脚体各部角加速度算出手段36による下腿部11の角加速度 $\alpha_2$ のデータと、脚体姿勢算出手段29による下腿部11の傾斜角度 $\theta d$ のデータと、前記式(10)により求められた関節反力 $T(F_{2x}, F_{2z})$ のデータと、あらかじめ求めた下腿部11の慣性モーメント $I_{G2}$ 、サイズ( $Ld$ )、重心 $G2$ の位置( $t_2$ )のデータとから前記式(11)により求められる。

#### 【0115】

関節モーメント推定手段40は、上記のようにして下腿部11の膝関節10の部分に作用するモーメント $M_2$ を求めた後、その算出処理と同様の処理によって、大腿部9の股関節8の部分に作用するモーメントを求める。この処理の基本的な考え方は、膝関節10のモーメント $M_2$ を求める手法と同一であるので、詳細な図示及び説明は省略するが、その概要は次の通りである。

#### 【0116】

すなわち、まず、大腿部9の重心 $G1$ (図4参照)の並進運動に関する運動方程

式に基づく次式(12)(前記式(10)と同じ形の式)により、大腿部9の股関節8の部分に作用する関節反力 $T(F_{3x}, F_{3z})$ が求められる。

【0117】

$$T(F_{3x}, F_{3z}) = T(F_{2x} - m_1 \cdot a_{1x}, F_{2z} - m_1 \cdot a_{1z} - m_1 \cdot g) \quad \dots\dots (12)$$

ここで、 $T(F_{2x}, F_{2z})$ は、先に前記式(10)により求めた膝関節10の関節反力である。また、 $T(a_{1x}, a_{1z})$ は、前記脚体各部加速度算出手段35により求められる大腿部9の重心G1の絶対座標系Cfにおける加速度(並進加速度)である。また、 $m_1$ はあらかじめ求めた大腿部9の重量、 $g$ は重力加速度である。

【0118】

次いで、大腿部9の重心G1の回りの回転運動に関する運動方程式に基づく次式(13)(前記式(11)と同じ形の式)により、大腿部9の股関節8の部分に作用するモーメント $M_3$ が求められる。

【0119】

$$\begin{aligned} M_3 = & M_2 - I_{G1} \cdot \alpha_1 + F_{2x} \cdot t1' \cdot \cos \theta c - F_{2z} \cdot t1' \cdot \sin \theta c \\ & + F_{3x} \cdot t1 \cdot \cos \theta c - F_{3z} \cdot t1 \cdot \sin \theta c \quad \dots\dots (13) \end{aligned}$$

ここで、 $M_2$ は、前記式(11)により求められた膝関節10のモーメント、 $T(F_{2x}, F_{2z})$ は、前記式(10)により求められた膝関節10の関節反力、 $T(F_{3x}, F_{3z})$ は、前記式(12)により求められた股関節8の関節反力、 $I_{G1}$ は、あらかじめ求めた大腿部9の重心G1の回りの慣性モーメント、 $\alpha_1$ は前記脚体各部角加速度算出手段36により求められる大腿部9の角加速度、 $\theta c$ は前記脚体姿勢算出手段29により求められる大腿部9の傾斜角度である。また、 $t1$ は、股関節8の中心から大腿部9の重心G1までの距離(図4参照)、 $t1'$ は、膝関節10の中心から大腿部9の重心G1までの距離(図4では $Lc - t1$ )であり、これらは、あらかじめ求めた重心G1の位置や大腿部9のサイズ(長さ)から定まるものである。

【0120】

以上説明した処理が、前記演算処理装置16のサイクルタイム毎に逐次実行さ

れ、各脚体 2 に作用する床反力や、各脚体 2 の膝関節 10 及び股関節 8 に作用するモーメントが逐次リアルタイムで推定される。

#### 【0121】

尚、本明細書での詳細な説明は省略するが、求められた膝関節 10 や股関節 8 のモーメントの推定値は、例えば人間 1 の歩行を補助する装置（膝関節 10 や股関節 8 に補助トルクを付与可能な電動モータ等を含む装置）の制御に用いられる。

#### 【0122】

前述した演算処理装置 16 の処理により求められた床反力作用点の推定値の経時変化の様子の一例を図 9 及び図 10 に実線で示す。図 9 及び図 10 は例えば約 4.5 km/h の移動速度で人間 1 が平地歩行を行った場合に一方の脚体 2 が接地してから離床するまでの該脚体 2 の床反力作用点の推定値の x 軸方向成分（進行方向における水平方向成分）、z 軸方向成分（鉛直方向成分）の経時変化の様子をそれぞれ実線で示したものである。この場合、図 9 では x 軸方向成分は、床 A に対して固定された絶対座標系 C<sub>f</sub> に変換して表している。また、図 10 では z 軸方向成分は、身体座標系 C<sub>p</sub> における z 軸座標値（股関節 8 の中心から床反力作用点までの鉛直方向距離に相当）で表している。また、図 9、図 10 には、フォースプレート等を用いて実測した床反力作用点の x 軸方向成分、z 軸方向成分を破線で併記している。これらの図 9 及び図 10 に見られるように、床反力作用点の推定値は、実測値に比較的良好な精度で合致する。

#### 【0123】

なお、図 10 に示す z 軸方向成分に関し、脚体 2 が離床する直前では、推定値と実測値の誤差が比較的大きくなる。これは、本実施形態では、足首関節 12 と床反力作用点との間の鉛直方向距離を一定として（図 5 の足首関節・接地面間距離 H<sub>a</sub> に等しいとして）、床反力作用点の鉛直方向位置（z 軸方向位置）を求めているため、脚体 2 の離床の直前のように、足平部 13 の踵側が床 A から浮くような状況では、床反力作用点の鉛直方向位置の誤差が大きくなるためである。

#### 【0124】

また、図 9 に関して補足すると、同図 9 には、MP 関節 13a、身体重心 G<sub>0</sub>、

および足首関節 12 の x 軸方向位置の算出値（絶対座標系 Cf に変換したもの）も併記している。平地歩行における床反力作用点の x 軸方向位置は、前述のように推定されるので、身体重心 G0 が足首関節 12 よりも後側に在る期間（時刻 t1 までの期間）では、床反力作用点の x 軸方向位置は、足首関節 12 の x 軸方向位置に合致し、身体重心 G0 が x 軸方向で足首関節 12 と MP 関節 13 a との間に在る期間（時刻 t1～t2 の期間）では、床反力作用点の x 軸方向位置は身体重心 G0 の x 軸方向位置に合致している。さらに、身体重心 G0 が MP 関節 13 a よりも前側に在る期間（時刻 t2 以降の期間）では、床反力作用点の x 軸方向位置は、MP 関節 13 a の x 軸方向位置に合致している。

#### 【0125】

また、図 11～図 20 に膝関節 10 及び股関節 8 のモーメントの推定値の経時変化の様子を実線で例示する。図 11 および図 12 は例えば約 4.5 km/h の移動速度で人間 1 が平地歩行を行った場合に、前記演算処理装置 16 の演算処理で求められた膝関節モーメント、股関節モーメントをそれぞれ例示するもの、図 13 および図 14 は人間 1 が階段の下り歩行を行った場合に求められた膝関節モーメント、股関節モーメントをそれぞれ例示するもの、図 15 および図 16 は人間 1 が階段の登り歩行を行った場合に求められた膝関節モーメント、股関節モーメントをそれぞれ例示するものである。また、図 17 および図 18 は人間 1 が椅子に座る動作を行なった場合に求められた膝関節モーメント、股関節モーメントをそれぞれ例示するもの、図 19 および図 20 は人間 1 が椅子から立ち上がる動作を行った場合に求められた膝関節モーメント、股関節モーメントをそれぞれ例示するものである。これらの図 11～図 20 では、トルクメータ等を用いて実測したモーメントを破線で併記している。これらの図 11～図 20 に見られるように、モーメントの推定値の変化の傾向は、実測値に良く合致している。このことから、本実施形態で求められる床反力作用点の推定位置は、脚体 2 の関節モーメントを推定する上で十分に適正な精度で求められることが判る。

#### 【0126】

以上のように本実施形態によれば、床反力作用点を推定するために複数種類の相関データ等を使用することなく、人間 1 の平地歩行や、階段もしくは坂道での

歩行、あるいは椅子に座ったり、椅子から立ち上がる動作を行なっているときの床反力作用点の位置を簡単な手法で推定することができる。

#### 【0127】

次に、本発明の第2実施形態を前記図2～図8、並びに図21を参照して説明する。なお、本実施形態は、第1実施形態と一部の構成および処理のみが相違するものであるので、第1実施形態と同一構成もしくは同一機能部分については、第1実施形態と同一の参照符号および図面を用いて説明を省略する。

#### 【0128】

図2を参照して、本実施形態では、人間1には、前記第1実施形態で説明した装置に加えて、各脚体2の足首関節12に、該足首関節2の屈曲角度 $\Delta\theta d$ に応じた信号を出力する足首関節角度センサ24が装着されている。該足首角度センサ24は、膝関節角度センサ23等と同様にポテンシオメータにより構成されたものであり、足首関節12に図示しないベルト等を介して固定されている。そして、足首関節角度センサ24は、その出力を演算処理装置16に入力すべく図示しない信号線を介して演算処理装置16に接続されている。

#### 【0129】

ここで、各足首関節角度センサ24が検出する屈曲角度 $\Delta\theta d$ は、足首関節12の中心とこの足首関節12に連なる足平部13のMP関節13aの中心とを結ぶ線と、下腿部11の軸心とのなす角度である。

#### 【0130】

また、図3を参照して、本実施形態における演算処理装置16では、上記各足首関節角度センサ24の出力が入力され、それが、MP位置算出手段33に与えられるようになっている。また、MP位置算出手段33には、足首位置算出手段32により算出された足首関節12の位置（身体座標系Cpにおける位置）が前記第1実施形態と同様に与えられる他、さらに、脚体姿勢算出手段29により算出された下腿部11の傾斜角度 $\theta d$ が与えられるようになっている。

#### 【0131】

以上説明した以外の構成は、前記第1実施形態と同一である。

#### 【0132】

前述のような構成を有する本実施形態では、演算処理装置 16 の MP 位置算出手段 33 の処理と床反力作用点推定手段 38 の処理のみが前記第 1 実施形態と相違している。より詳しくは、本実施形態は、MP 関節 13 a の位置を前記第 1 実施形態のものよりもより精度よく把握し、ひいては、床反力作用点の位置の推定精度を第 1 実施形態のものよりも高めるものである。以下に、本実施形態における MP 位置算出手段 33 の処理と床反力作用点推定手段 38 の処理とを詳説する。

#### 【0133】

MP 位置算出手段 33 の処理では、足首関節角度センサ 24 の検出データ等を用いて次のように MP 関節 13 a の位置（詳しくは身体座標系 Cp における x 軸方向および z 軸方向の位置）が求められる。

#### 【0134】

すなわち、図 21 を参照して、足首関節 12 の中心と MP 関節 13 a の中心とを結ぶ線分 S（以下、足平幹線 S という）を想定し、この足平幹線 S が鉛直方向（z 軸方向）に対してなす角度（足平幹線 S の傾斜角度）を  $\theta_e$ 、足平幹線 S の長さ（足首関節 12 と MP 関節 13 a との距離）を  $L_s$  とすると、足首関節 12 と MP 関節 13 a との水平方向（x 軸方向）の距離  $\Delta x_{mp}$  及び鉛直方向（z 軸方向）の距離  $\Delta z_{mp}$ 、すなわち、足首関節 12 に対する MP 関節 13 a の位置  $T$ （ $\Delta x_{mp}$ ,  $\Delta z_{mp}$ ）は次式（14）により与えられる。

#### 【0135】

$$T(\Delta x_{mp}, \Delta z_{mp}) = (L_s \cdot \sin \theta_e, L_s \cdot \cos \theta_e) \cdots \cdots (14)$$

この場合、足平部 13 は、ほぼ剛体とみなすことができ、このとき  $L_s$  は定数となる。

#### 【0136】

また、足平幹線 S の傾斜角度  $\theta_e$  は、前記足首関節角度センサ 24 により検出される足首関節 12 の屈曲角度  $\Delta \theta_e$  と、前記脚体姿勢算出手段 29 により求められる下腿部 11 の傾斜角度  $\theta_d$  とを用いて次式（15）により与えられる。

#### 【0137】

$$\theta_e = \theta_d - (180 - \Delta \theta_e) \cdots \cdots (15)$$



なお、式(15)では、角度の単位として「度」を用いている。

#### 【0138】

そこで、MP位置算出手段33の処理では、まず、前記脚体姿勢算出手段28により求められた各脚体2の下腿部11の傾斜角度 $\theta_d$ のデータの今回値と、該脚体2に装着されている前記足首関節角度センサ24による足首関節12の屈曲角度 $\Delta\theta_e$ の検出データの今回値とから、上記式(15)により、足平幹線Sの傾斜角度 $\theta_e$ が求められる。そして、この求めた傾斜角度 $\theta_e$ と、人間1に対してあらかじめ実測して演算処理装置16に記憶保持した足平幹線Sの長さ $L_s$ とから、前記式(14)により足首関節12に対するMP関節13aの位置 $T(\Delta x_{mp}, \Delta z_{mp})$ が求められる。さらに、この位置 $T(\Delta x_{mp}, \Delta z_{mp})$ と、前記足首位置算出手段32で求めた足首関節12の位置(身体座標系 $C_p$ における位置) $T(x_{12}, z_{12})$ とのベクトル和を演算することにより、身体座標系 $C_p$ におけるMP関節13aの位置が求められる。

#### 【0139】

また、床反力作用点推定手段38の処理においては、接地している各脚体2の床反力作用点の水平方向位置(x軸方向位置)は、前記第1実施形態と同一の手法で求められる。従って、床反力作用点の水平方向位置の推定処理については説明を省略する。

#### 【0140】

一方、床反力作用点推定手段38の処理では、接地している各脚体2の床反力作用点の鉛直方向位置(z軸方向位置)の推定手法は、前記第1実施形態と相違し、次のように床反力作用点の鉛直方向位置が決定される。すなわち、まず、接地している各脚体2について、該脚体2の足首関節12と接地面(床A)との距離、すなわち、足首関節・接地面間距離が把握される。この場合、足首関節・接地面間距離の把握の仕方は、身体重心 $G_0$ がx軸方向でMP関節13aの前側にあるか後側にあるかで分けられる。身体重心 $G_0$ がMP関節13aの後側にある場合には、身体重心 $G_0$ がMP関節13aの後側にある場合には、一般に、足平部13の踵の底面が、床Aにはほぼ接触しているか、もしくは床A面とほぼ同等の高さ位置に存在している。そこで、この場合には、人間1の直立停止状態であらかじめ

実測されて演算処理装置 16 に記憶保持された前記足首関節基準高さ  $H_a$  (図 5 参照) が足首関節・接地面間距離として把握される。

【0141】

また、身体重心  $G_0$  が MP 関節 13a の前側にある場合には、一般に足平部 13 の踵が床 A 面よりも上側に浮いている。この場合には、次のようにして、足首関節・接地面間距離が算出される。すなわち、前記図 21 を参照して、足平部 13 の踵が床 A 面よりも上側に浮いている場合には、足首関節・接地面間距離は、足首関節 12 と MP 関節 13a との間の鉛直方向距離  $\Delta z_{mp}$  と、MP 関節 13a の接地面 (床 A 面) からの距離との和になる。この場合、MP 関節 13a の接地面からの距離は、前記図 5 に示したように人間 1 が直立姿勢で起立して、足平部 13 の底面のほぼ全面を床 A に接触させた状態 (前記直立停止状態) における MP 関節 13a の床 A 面からの距離  $H_b$  (以下、MP 関節基準高さ  $H_b$  という) とほぼ同一である。そこで、本実施形態では、上記 MP 関節基準高さ  $H_b$  が前記足首関節基準高さ  $H_a$  と共にあらかじめ実測されて演算処理装置 16 に記憶保持されている。そして、身体重心  $G_0$  が MP 関節 13a の前側にある場合には、足首関節 12 及び MP 関節 13a のそれぞれの身体座標系  $C_p$  における位置から把握される、それらの関節間の鉛直方向距離  $\Delta z_{mp}$  と、前記 MP 関節基準高さ  $H_b$  との和が足首関節・接地面間距離として求められる。

【0142】

なお、本発明の床反力作用点推定方法に対応させると、前記足首関節基準高さ  $H_a$  および MP 関節基準高さ  $H_b$  はそれぞれ第 1 基本鉛直方向距離、第 2 基本鉛直方向距離に相当するものである。

【0143】

上記のようにして、足首関節・接地面間距離を把握した後、床反力作用点の鉛直方向位置 ( $z$  軸方向位置) は、前記第 1 実施形態と同様に、その把握した足首・接地面間距離だけ、足首関節 12 の位置から鉛直下方に離れた位置として決定される。すなわち、床反力作用点の鉛直方向位置 (身体座標系  $C_p$  における位置) は、足首関節 12 の位置の  $z$  軸成分値から、上記の如く把握した足首関節・接地面間距離を減じた値 (但し、上向きを  $z$  軸の正方向とする) として決定される

## 【0144】

なお、本実施形態においても、前記第1実施形態と同様に、関節モーメント推定手段40による関節モーメントの算出を行うために、上記の如く決定した床反力作用点の身体座標系 $C_p$ における位置（ $xz$ 座標成分）は、さらに足首位置算出手段32で算出された、身体座標系 $C_p$ における足首関節12の位置を基準とした位置に変換される。

## 【0145】

以上説明したMP位置算出手段33および床反力作用点推定手段38以外の演算処理装置16の処理は、前記第1実施形態と同一である。

## 【0146】

かかる本実施形態では、MP関節13aの位置（ $x$ 軸方向および $z$ 軸方向位置）が比較的精度よく把握できるため、床反力作用点の位置、特に鉛直方向位置を第1実施形態のものよりも精度よく推定できる。ひいては、膝関節10や股関節8に作用する関節モーメントも第1実施形態のものよりも精度よく推定することができる。

## 【0147】

なお、床反力作用点の鉛直方向位置を推定するために求める足首関節・接地面間距離は、前記第1実施形態および第2実施形態で説明した手法以外の手法で求めることも可能である。例えば、各脚体2の下腿部11の適当な部位（具体的には、足首関節12から膝関節10側に下腿部11の軸心方向に所定距離だけ離れた部位）に、赤外線測距センサ等の光学的測距センサを装着しておき、この測距センサを備えた部位と床面（脚体2の接地面）との間の、下腿部11の軸心方向における距離を測定する。そして、この測定距離と下腿部11の傾斜角度 $\theta_d$ とから、幾何学演算（三角関数演算）により測距センサを備えた部位と床面との鉛直方向距離（以下、ここではセンサ・床面間鉛直距離という）を算出する。さらに、測距センサを備えた部位と足首関節12との距離（固定値）、および下腿部11の傾斜角度 $\theta_d$ とから、三角関数演算により該部位と足首関節12との間の鉛直方向距離を求め、その求めた鉛直方向距離を前記センサ・床面間鉛直距離か

ら差し引くことで、足首関節・接地面間距離を求める。このように足首関節・接地面間距離を求めることで、足首関節角度センサ 24 を用いることなく、床反力作用点の鉛直方向位置を精度よく推定することができる。なお、この場合、床反力作用点の水平方向位置は、前記第 1 実施形態と同じ手法で推定するようにすればよい。

#### 【0148】

また、以上説明した実施形態では、本発明を人間 1 に適用した場合を例にとって説明したが、二足歩行移動体としての二足歩行ロボットにも本発明を適用することができる。

#### 【図面の簡単な説明】

##### 【図 1】

本発明の実施形態における床反力推定手法の基本的原理を説明するための図。

##### 【図 2】

本発明の実施形態における二足歩行移動体としての人間と該人間に装備する装置構成を模式化して示す図。

##### 【図 3】

図 2 の装置に備える演算処理装置の機能を説明するためのブロック図。

##### 【図 4】

図 3 の演算処理装置の処理に用いる剛体リンクモデルを示す図。

##### 【図 5】

本発明の第 1 実施形態における中足趾節関節の位置（水平方向位置）の算出手法と、足首関節から接地面までの距離を把握する手法とを説明するための図。

##### 【図 6】

床反力作用点の水平方向位置の推定手法を説明するための図。

##### 【図 7】

床反力作用点の水平方向位置の推定手法を説明するための図。

##### 【図 8】

図 3 の演算処理装置の関節モーメント推定手段における処理を説明するための図。

**【図 9】**

本発明の第 1 実施形態により求められた平地歩行時の床反力作用点の水平方向位置経時変化の様子を例示するグラフ。

**【図 10】**

本発明の第 1 実施形態により求められた平地歩行時の床反力作用点の鉛直方向位置の経時変化の様子を例示するグラフ。

**【図 11】**

本発明の第 1 実施形態により求められた平地歩行時の膝関節モーメントの経時変化の様子を例示するグラフ。

**【図 12】**

本発明の第 1 実施形態により求められた平地歩行時の股関節モーメントの経時変化の様子を例示するグラフ。

**【図 13】**

本発明の第 1 実施形態により求められた階段下り歩行時の膝関節モーメントの経時変化の様子を例示するグラフ。

**【図 14】**

本発明の第 1 実施形態により求められた階段下り歩行時の股関節モーメントの経時変化の様子を例示するグラフ。

**【図 15】**

本発明の第 1 実施形態により求められた階段登り歩行時の膝関節モーメントの経時変化の様子を例示するグラフ。

**【図 16】**

本発明の第 1 実施形態により求められた階段登り歩行時の股関節モーメントの経時変化の様子を例示するグラフ。

**【図 17】**

本発明の第 1 実施形態により求められた、椅子への座り動作時の膝関節モーメントの経時変化の様子を例示するグラフ。

**【図 18】**

本発明の第 1 実施形態により求められた、椅子への座り動作時の股関節モーメントの経時変化の様子を例示するグラフ。

ントの経時変化の様子を例示するグラフ。

【図 19】

本発明の第 1 実施形態により求められた、椅子からの立ち上がり動作時の膝関節モーメントの経時変化の様子を例示するグラフ。

【図 20】

本発明の第 1 実施形態により求められた、椅子からの立ち上がり動作時の股関節モーメントの経時変化の様子を例示するグラフ。

【図 21】

本発明の第 2 実施形態における中足趾節関節の位置の算出手法と、足首関節から接地面までの距離を把握する手法とを説明するための図。

【符号の説明】

1…人間（二足歩行移動体）、2…脚体、8…股関節、9…大腿部、10…膝関節、11…下腿部、12…足首関節、13…足平部、13a…中足趾節関節、14, 15, 19, 20…傾斜センサ、20, 21…加速度センサ、22, 23, 24…角度センサ、51r…第 1 接地センサ、51f…第 2 接地センサ。

【書類名】

図面

【図 1】

FIG.1 (a)

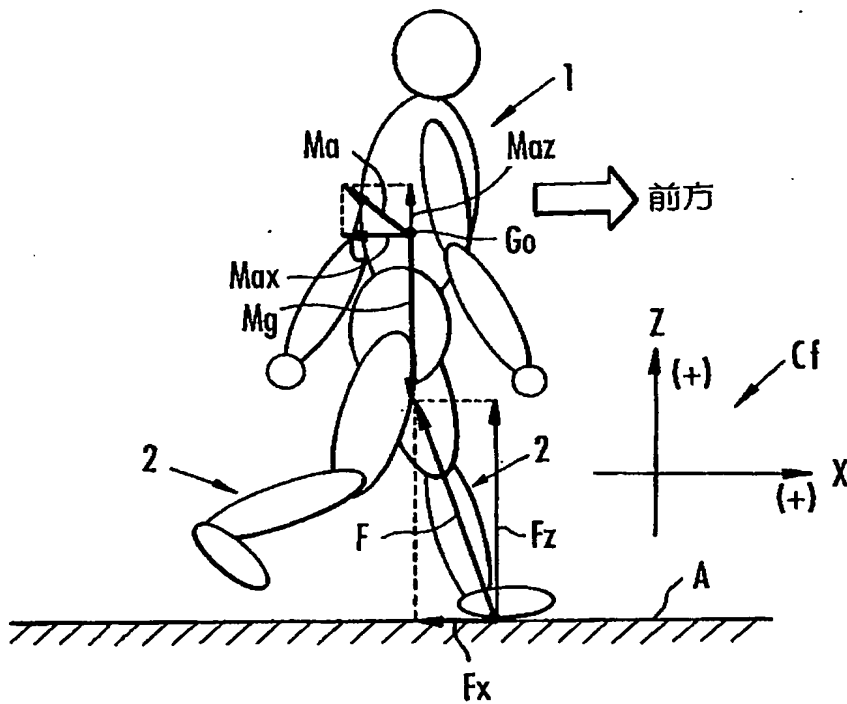
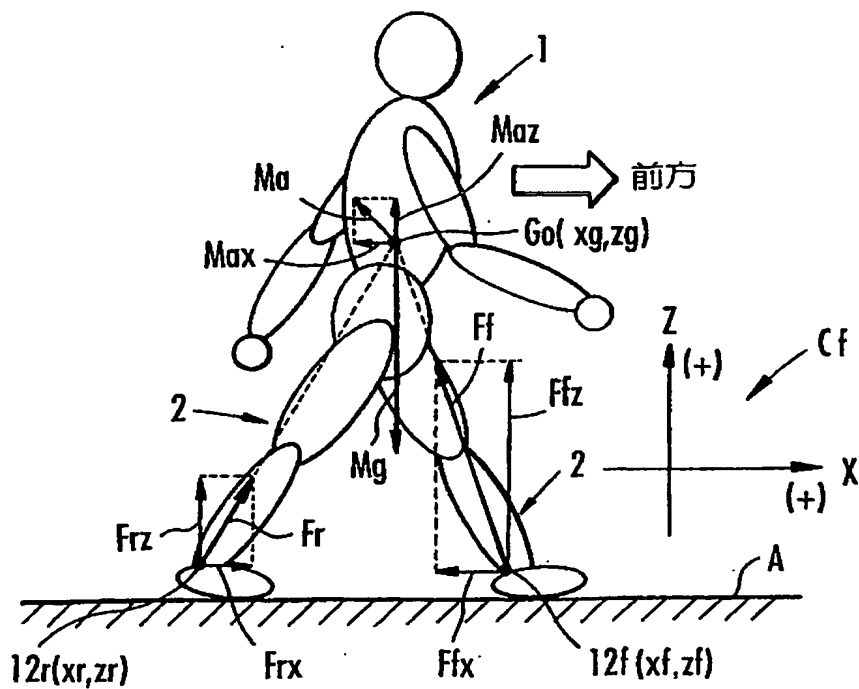


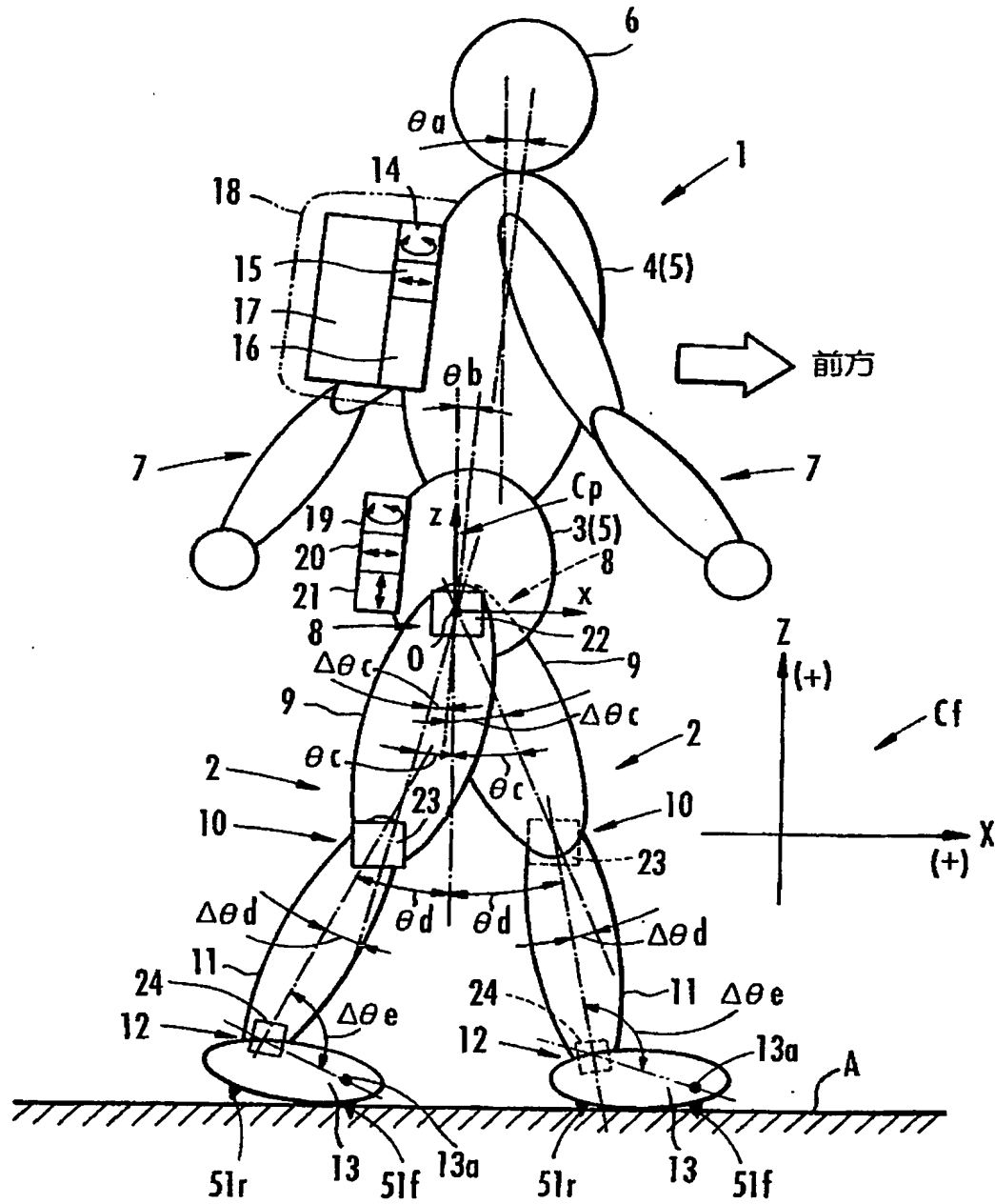
FIG.1 (b)



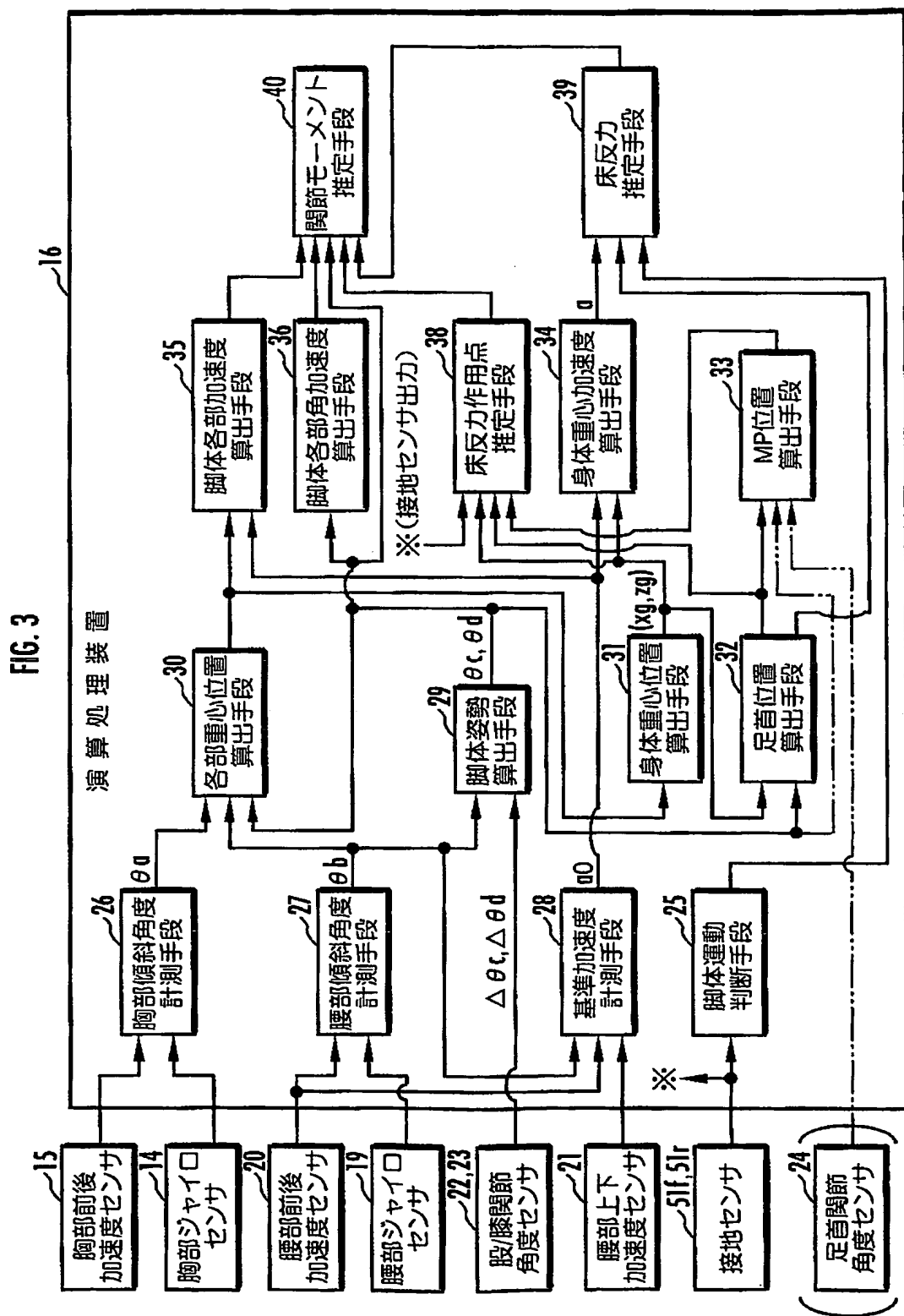


【図 2】

FIG.2

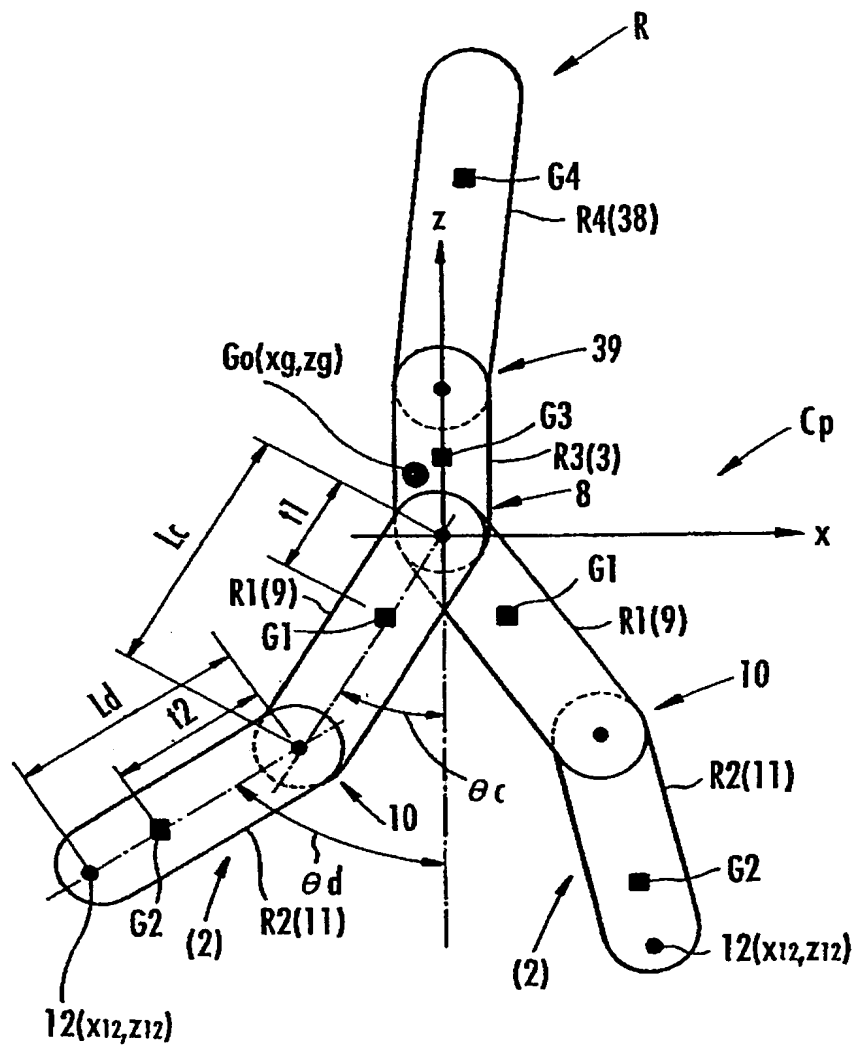


【図 3】

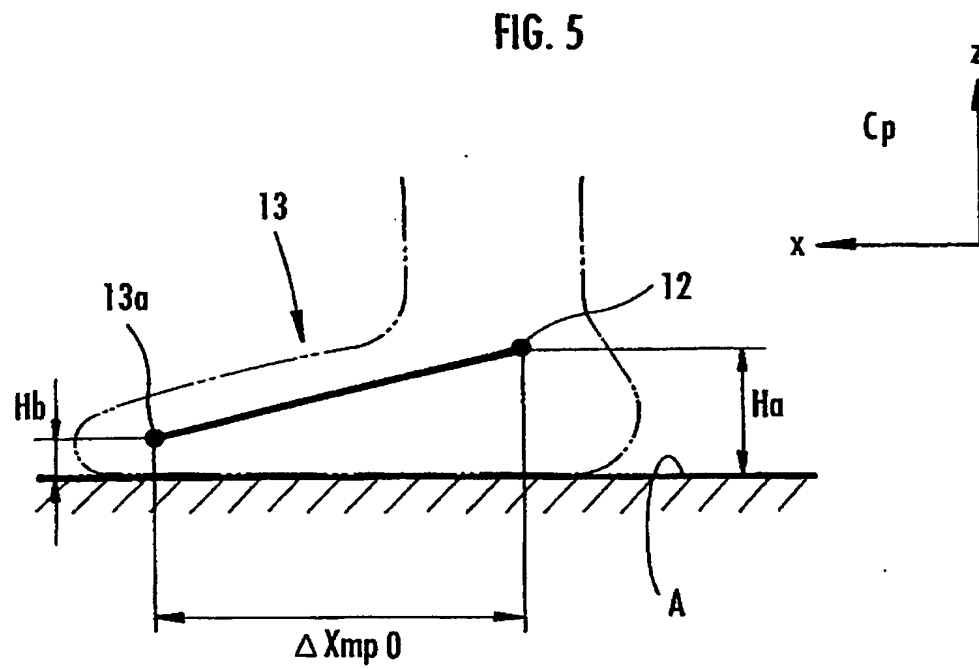


【図 4】

FIG.4



【図 5】



【図 6】

FIG. 6 (b)

足首直下接地センサ: OFF  
MP 直下接地センサ: ON

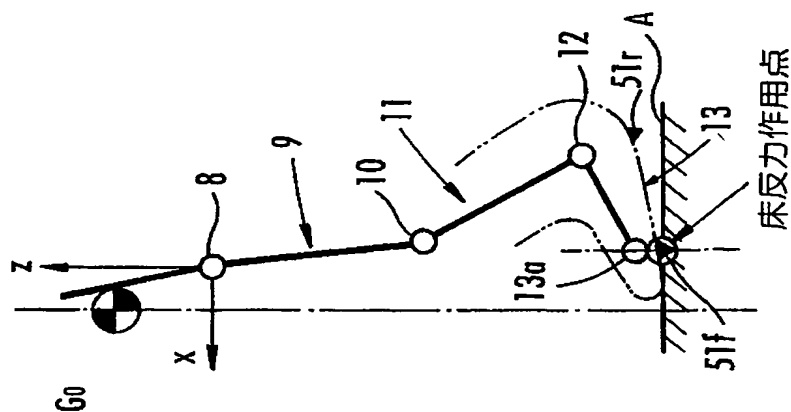
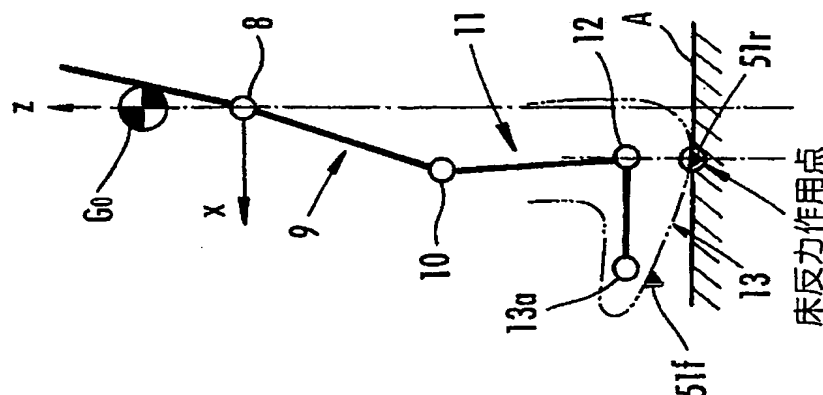


FIG. 6 (a)

足首直下接地センサ: ON  
MP 直下接地センサ: OFF



【図 7】

FIG. 7 (c)

足首直下接地センサ : ON  
MP 直下接地センサ : ON

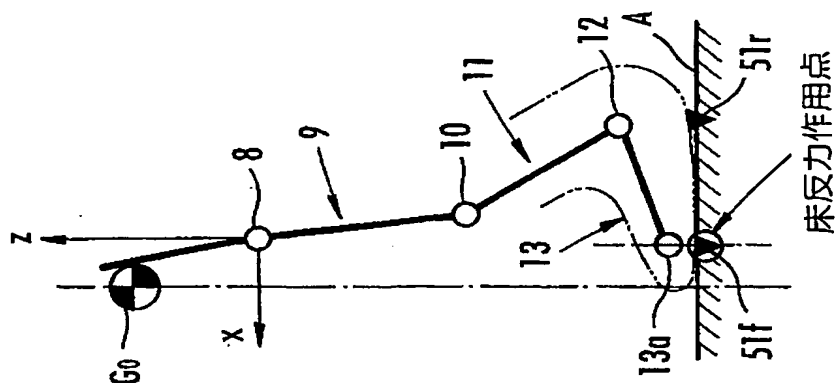


FIG. 7 (b)

足首直下接地センサ : ON  
MP 直下接地センサ : ON

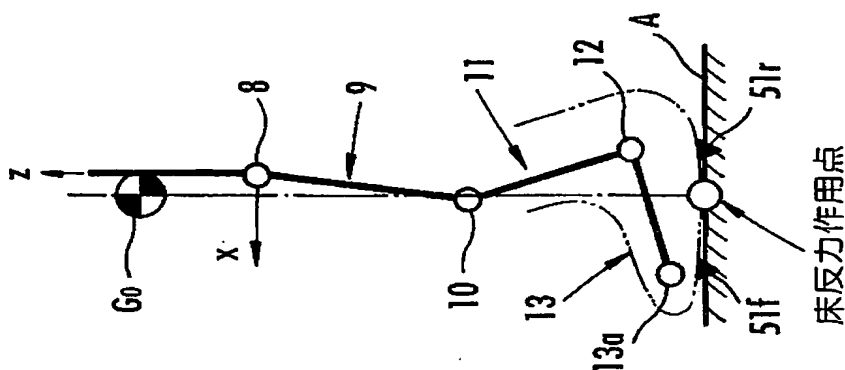
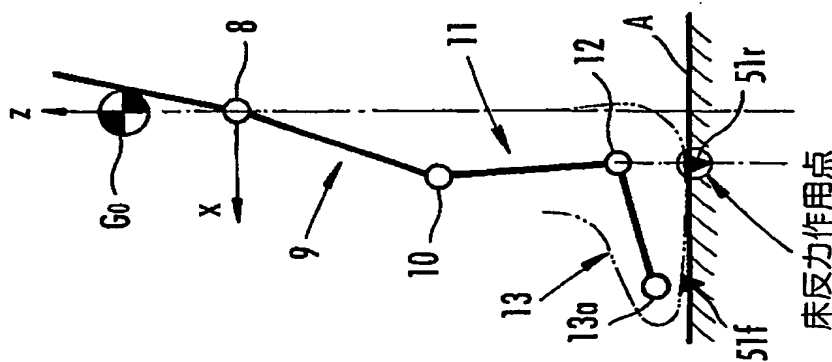


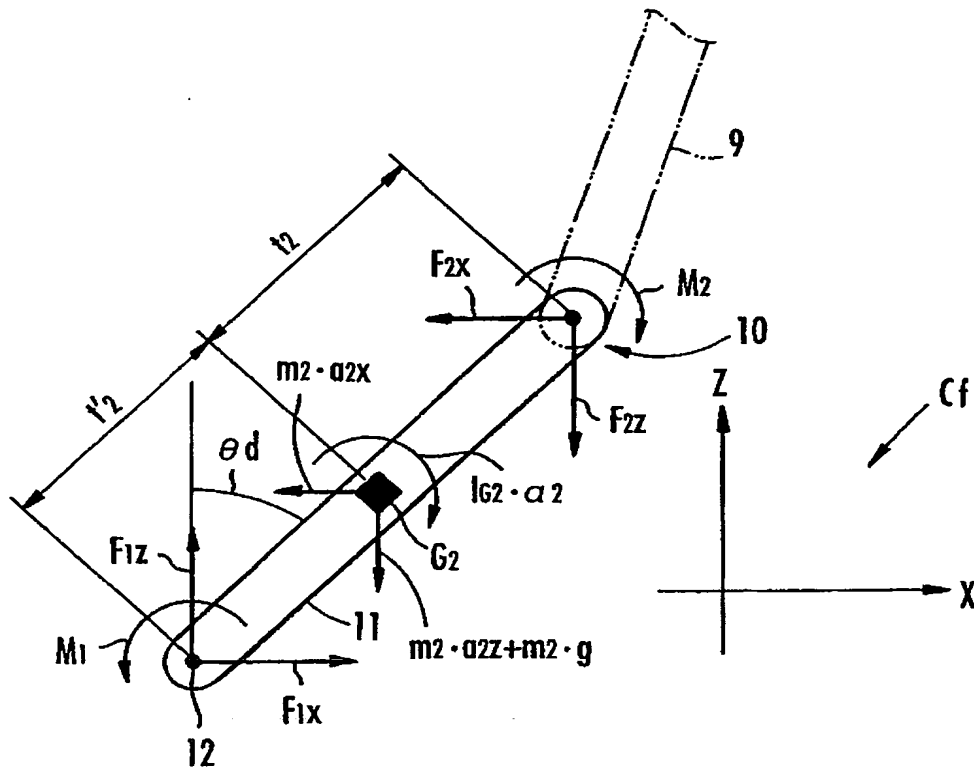
FIG. 7 (a)

足首直下接地センサ : ON  
MP 直下接地センサ : ON



【図 8】

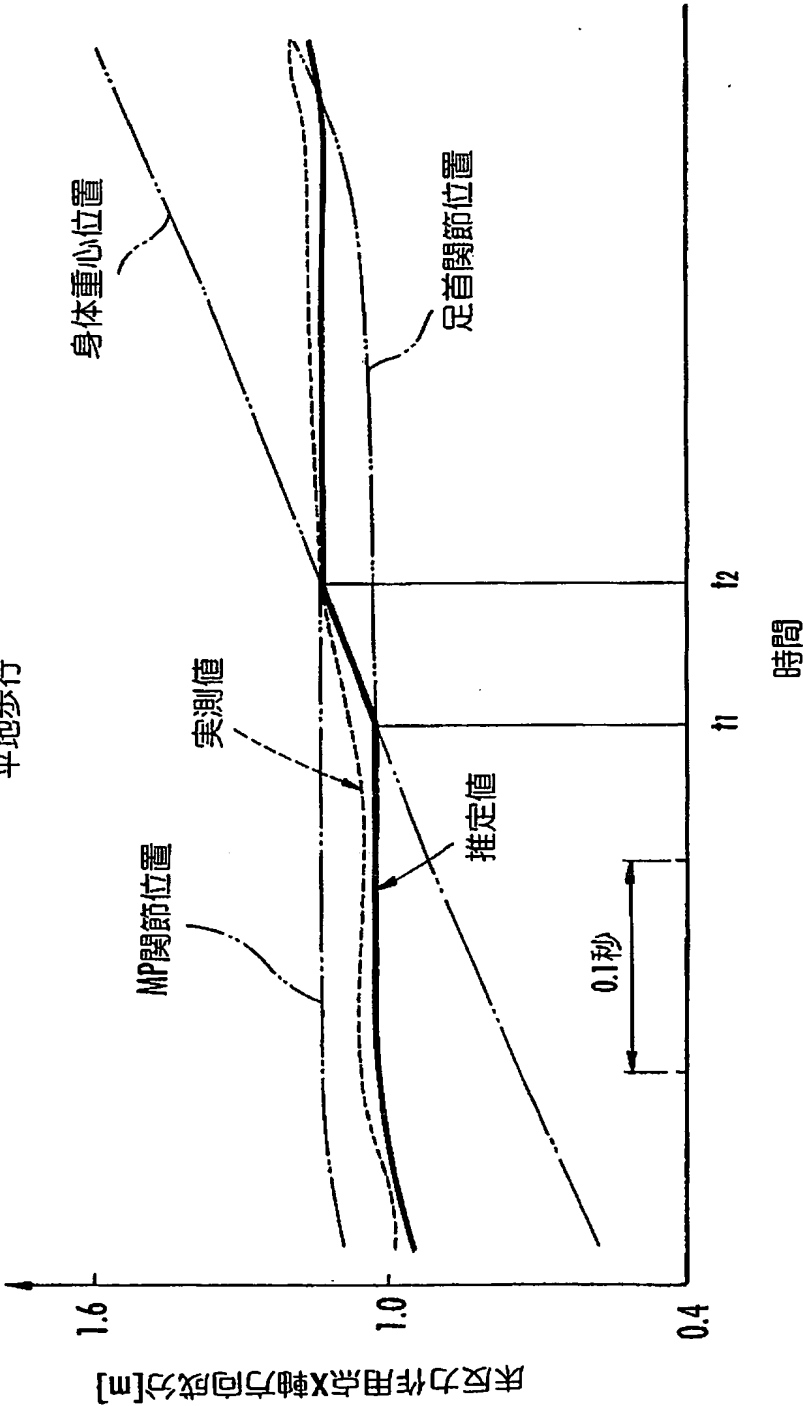
FIG. 8



【図 9】

FIG.9

平地歩行

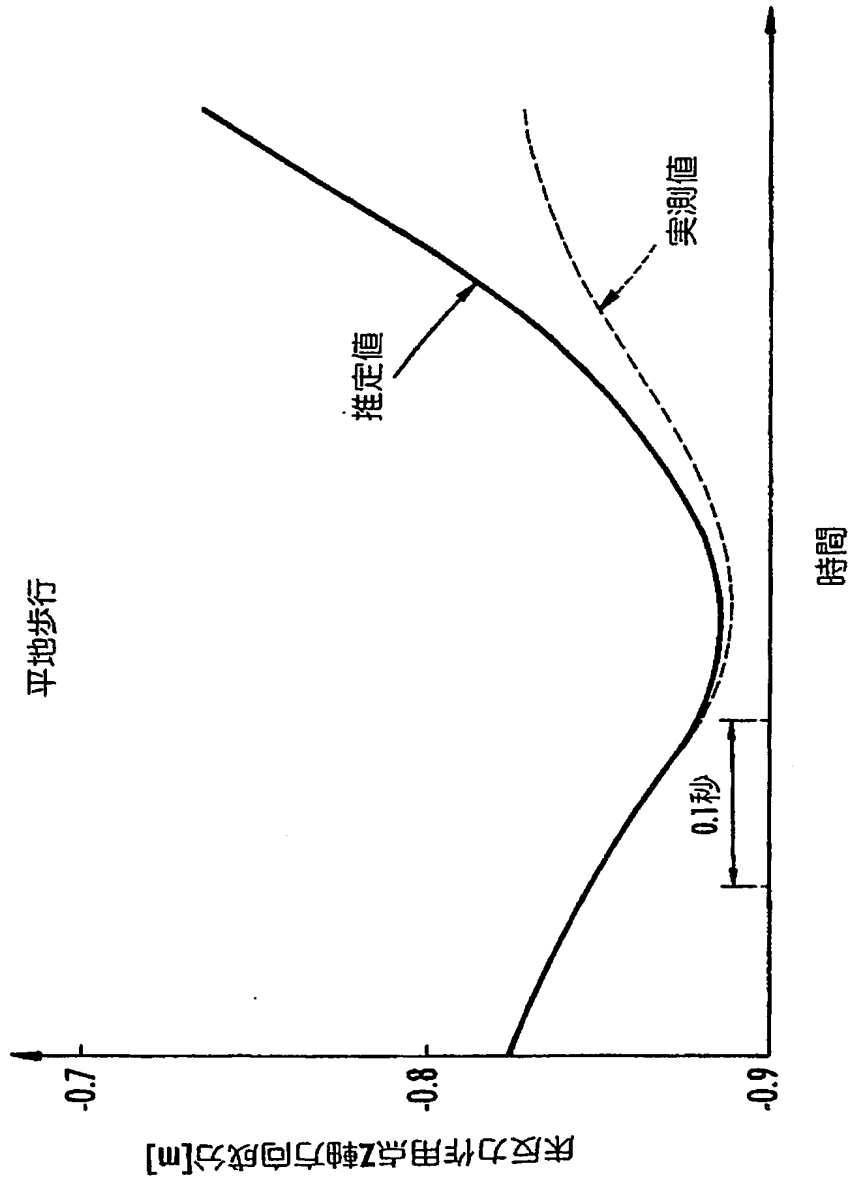




【図 10】

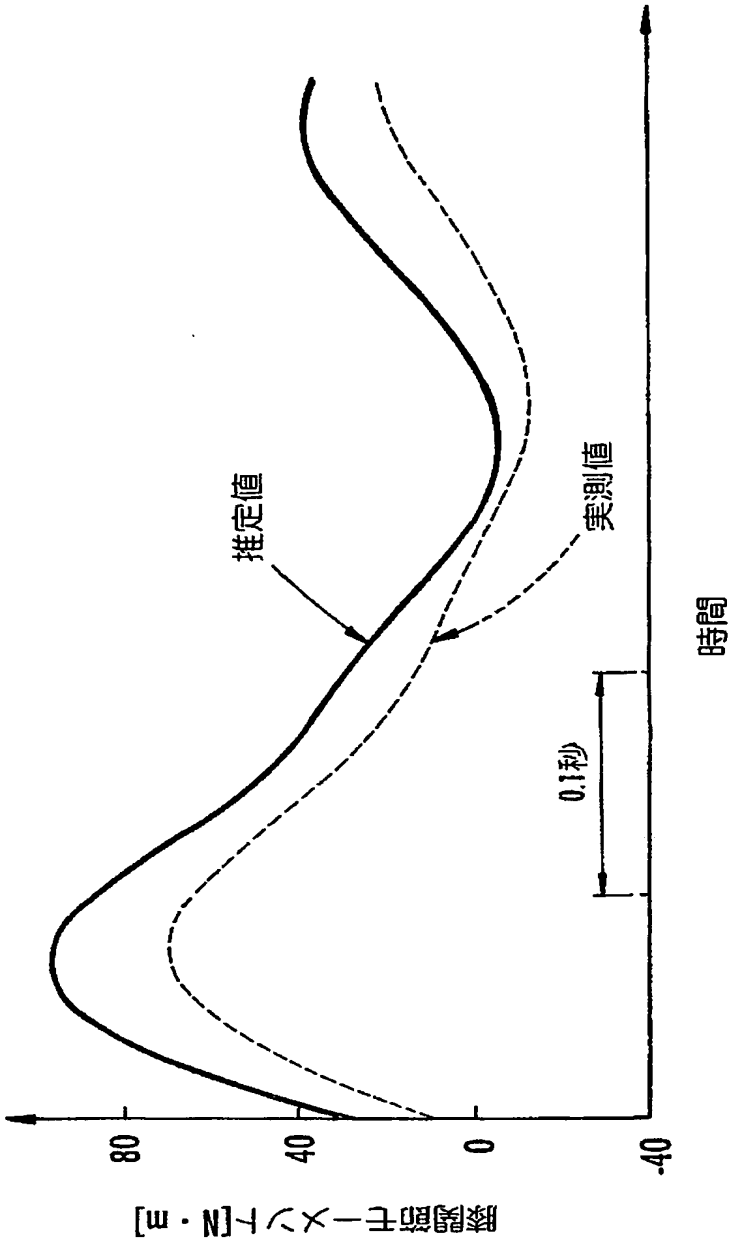
FIG.10

平地歩行



【図 11】

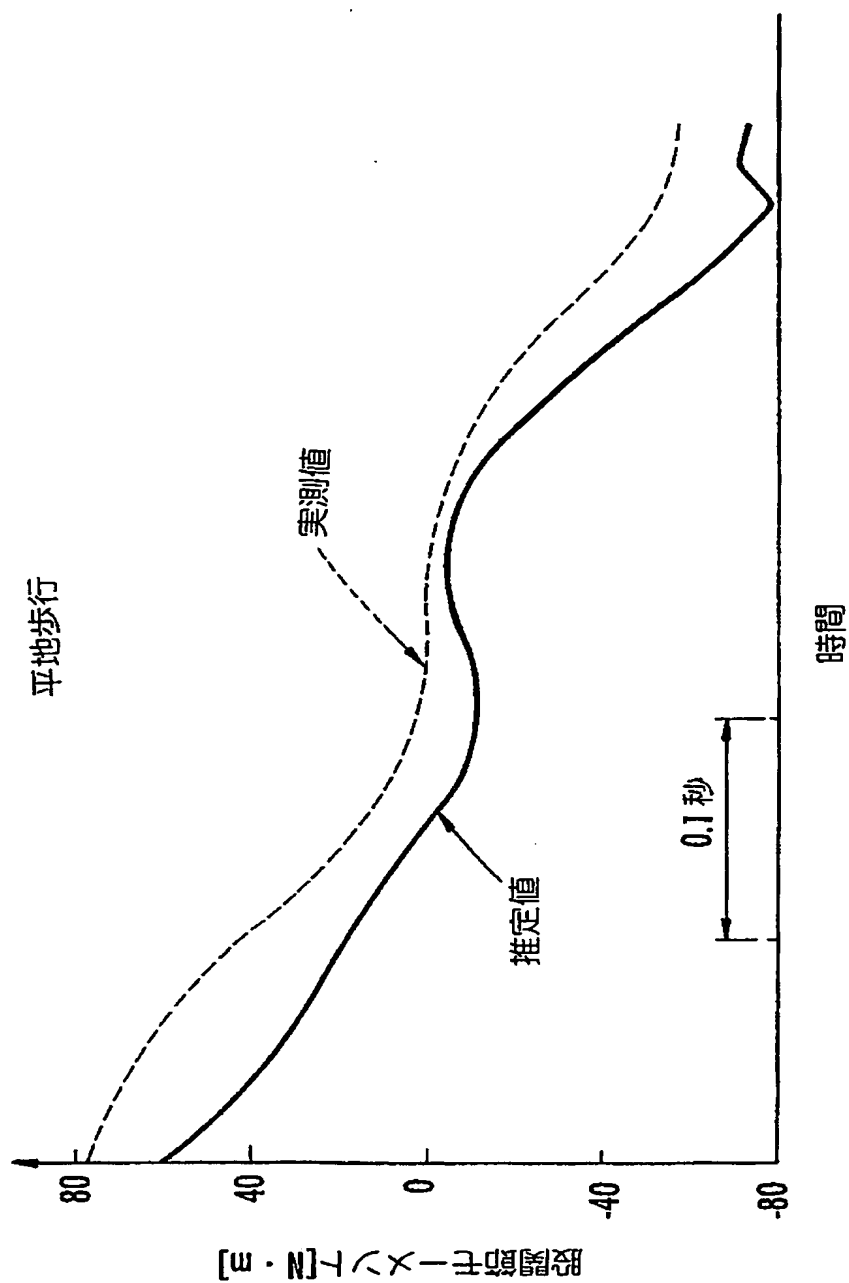
FIG.11  
平地歩行



【図 12】

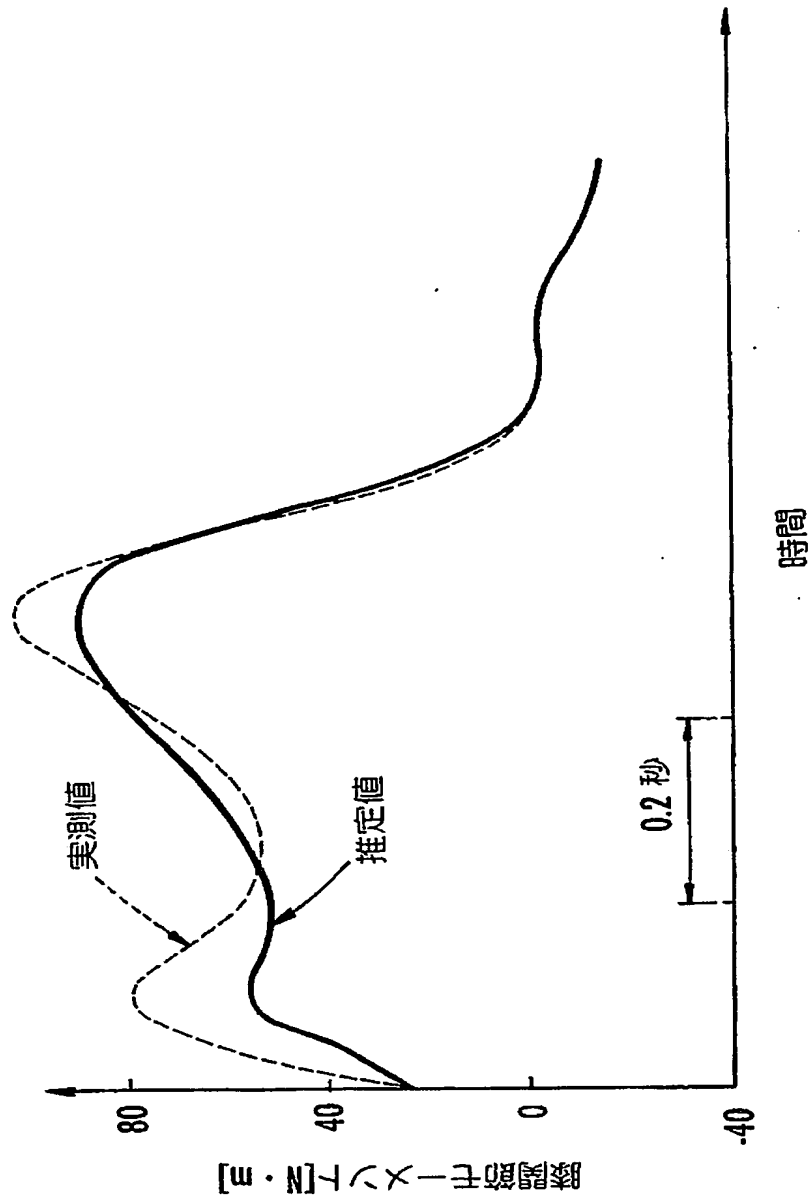
FIG.12

平地歩行



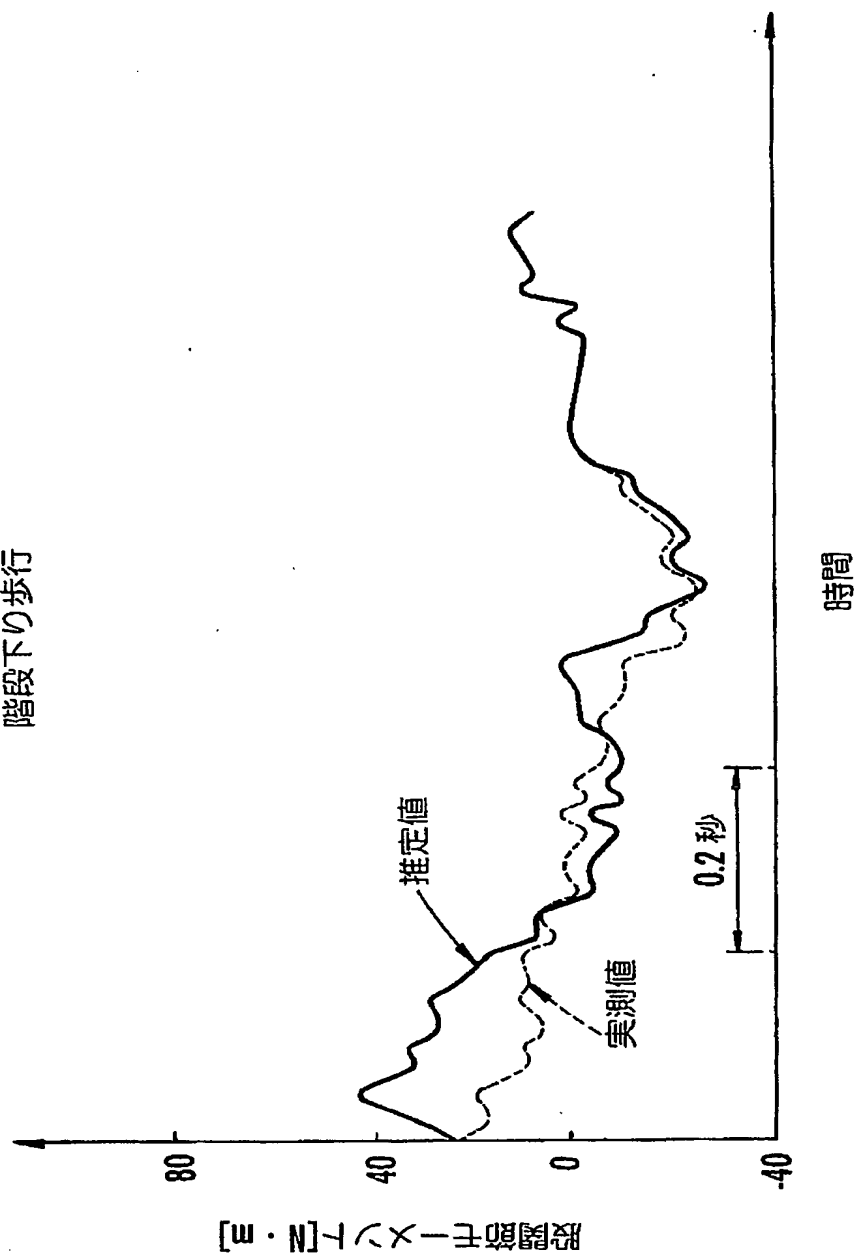
【図 13】

FIG.13  
階段下り歩行



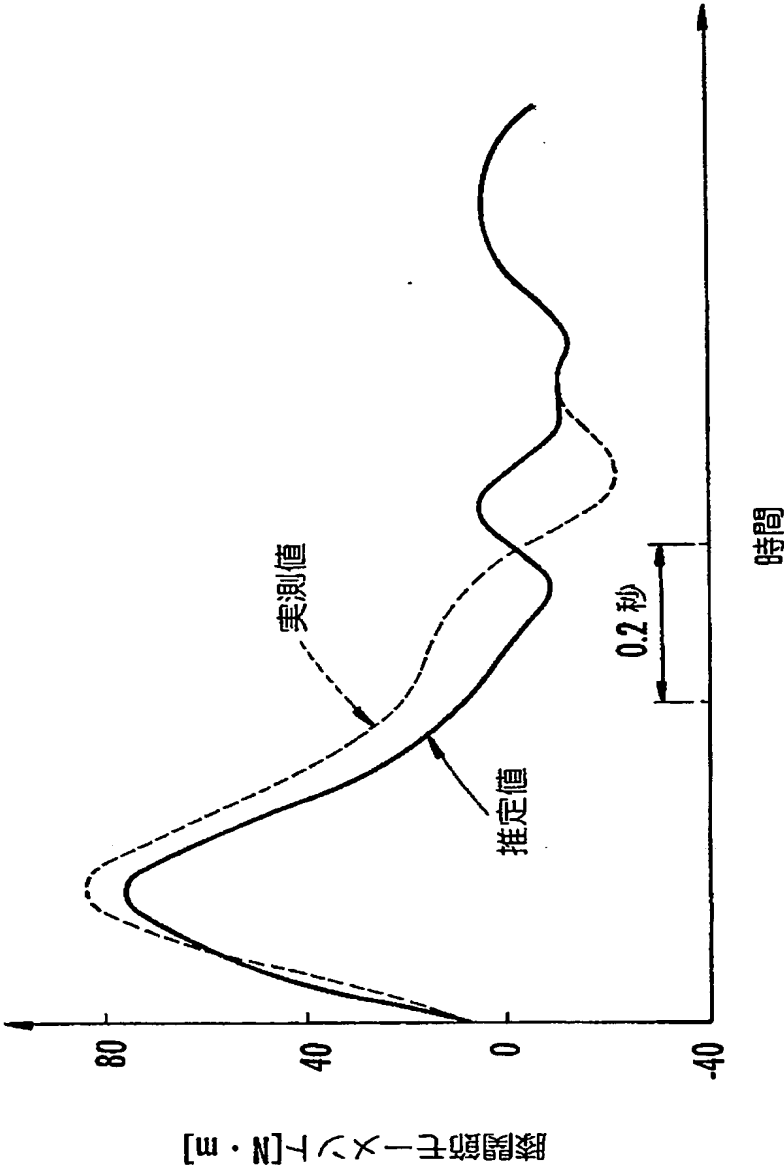
【図 14】

FIG.14  
階段下り歩行



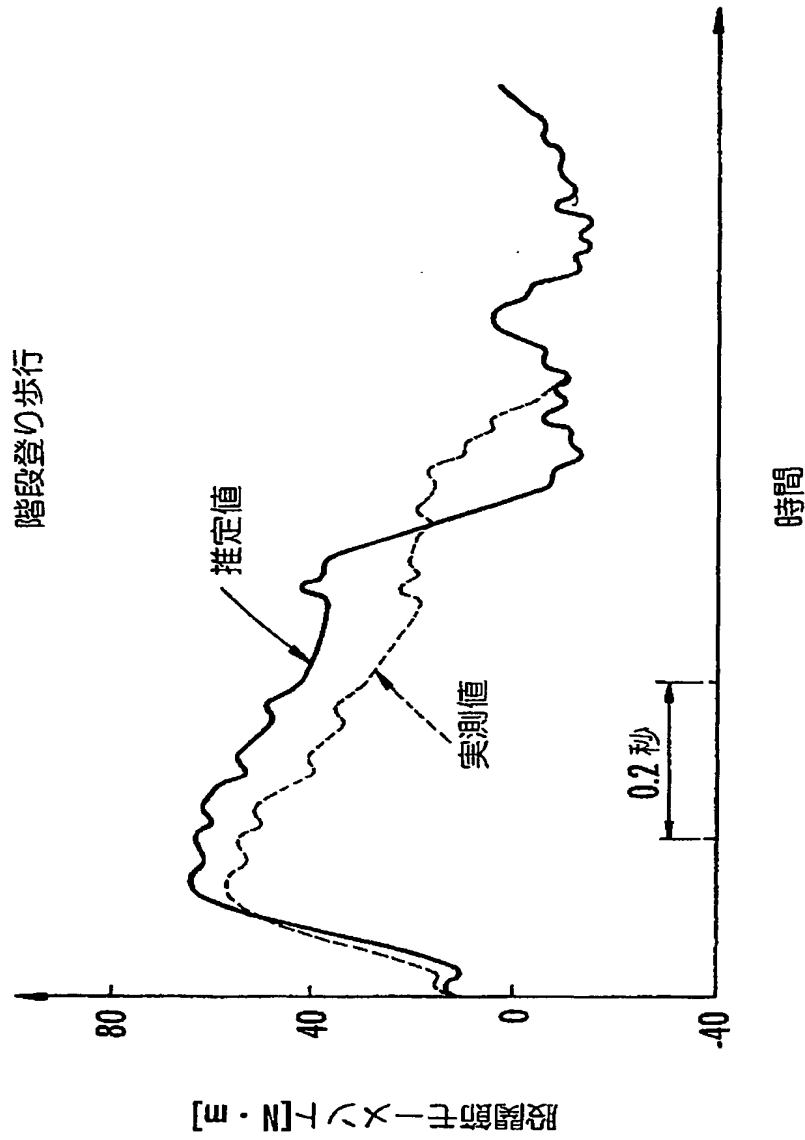
【図 15】

FIG.15  
階段登り歩行



【図 16】

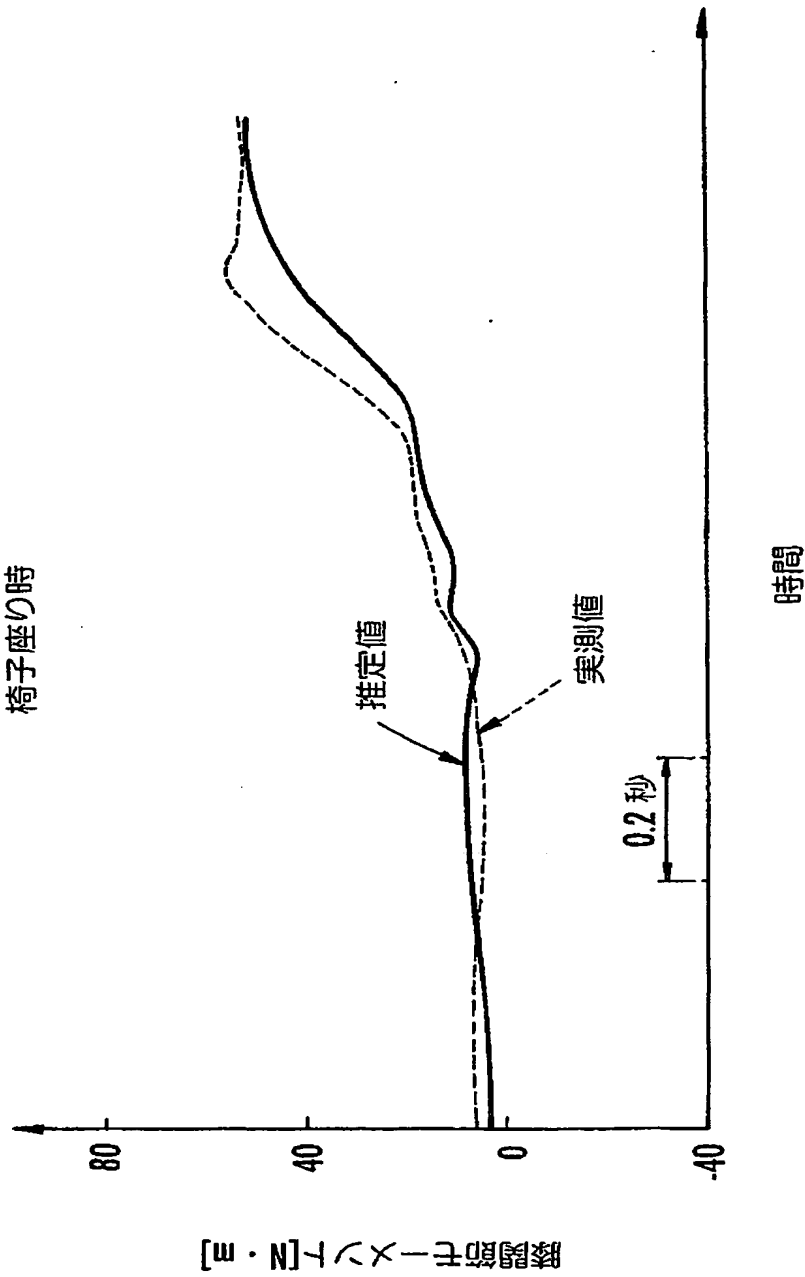
FIG.16



【図 17】

FIG.17

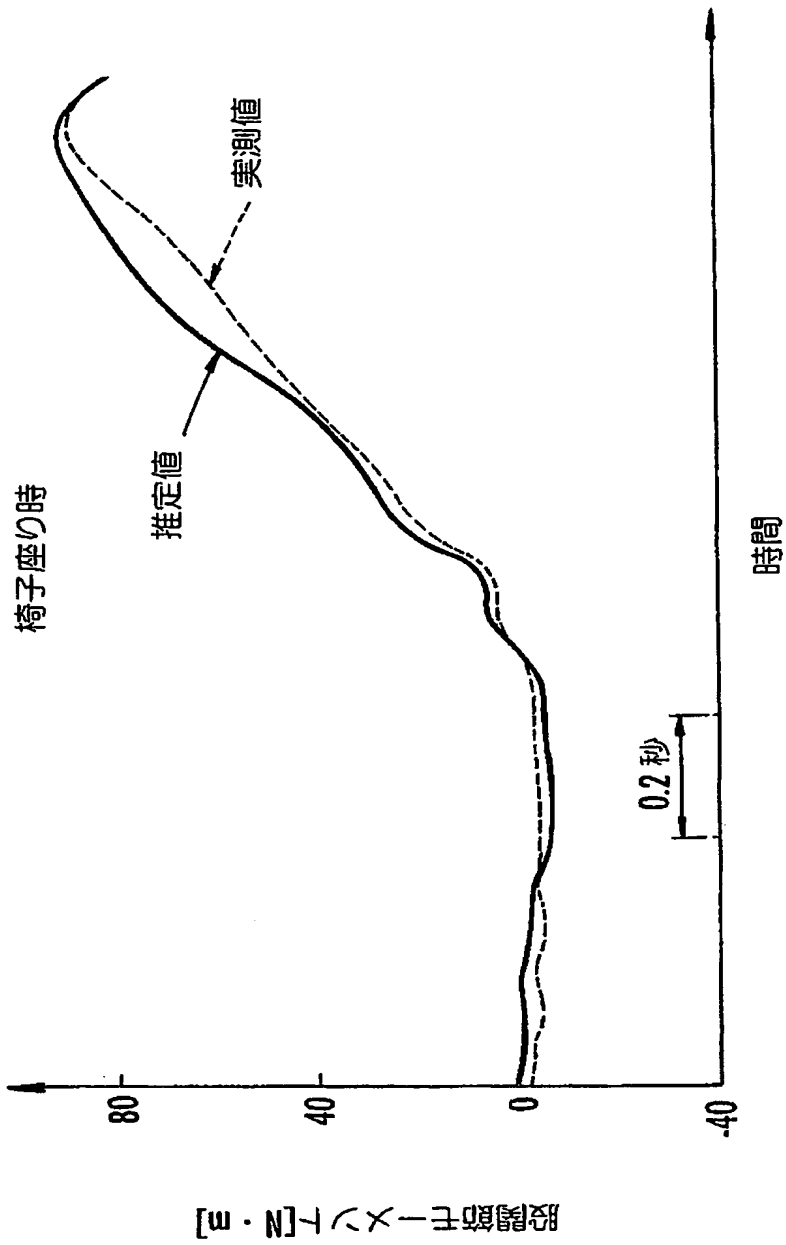
椅子座り時





【図 18】

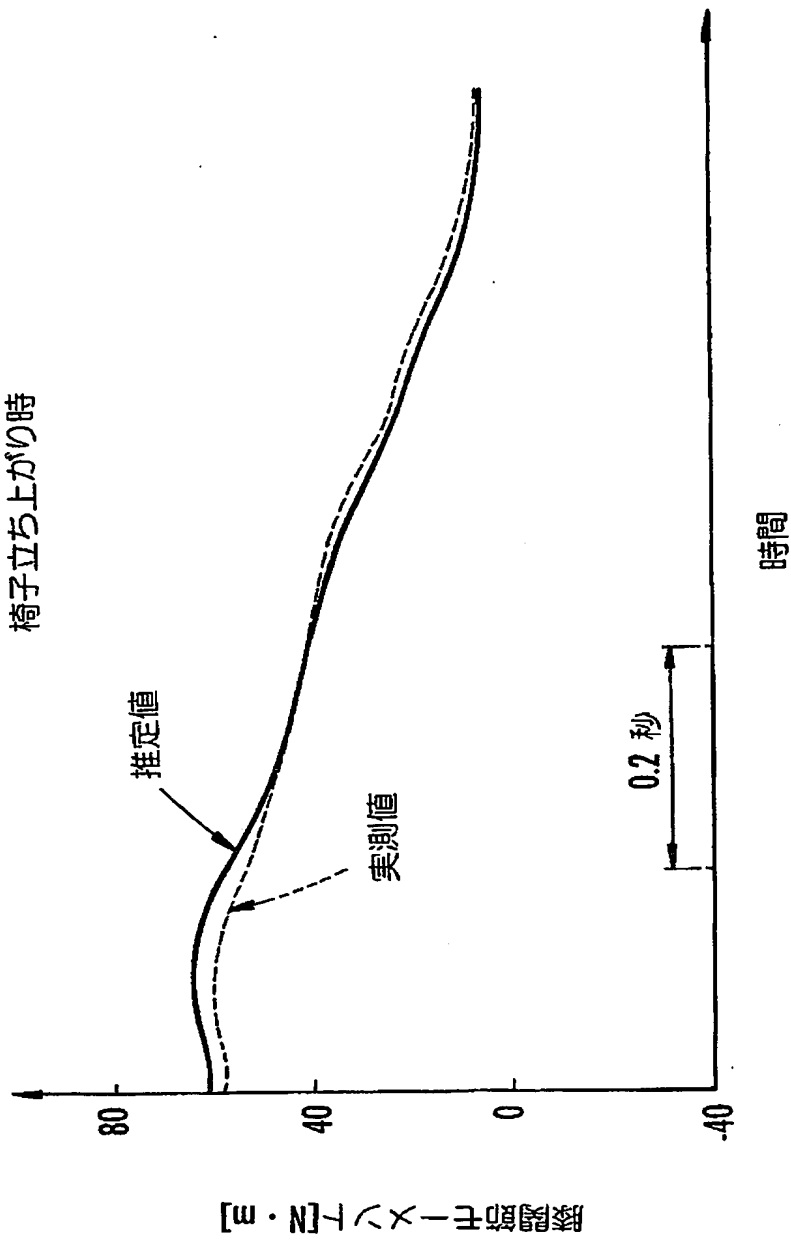
FIG.18



【図19】

FIG.19

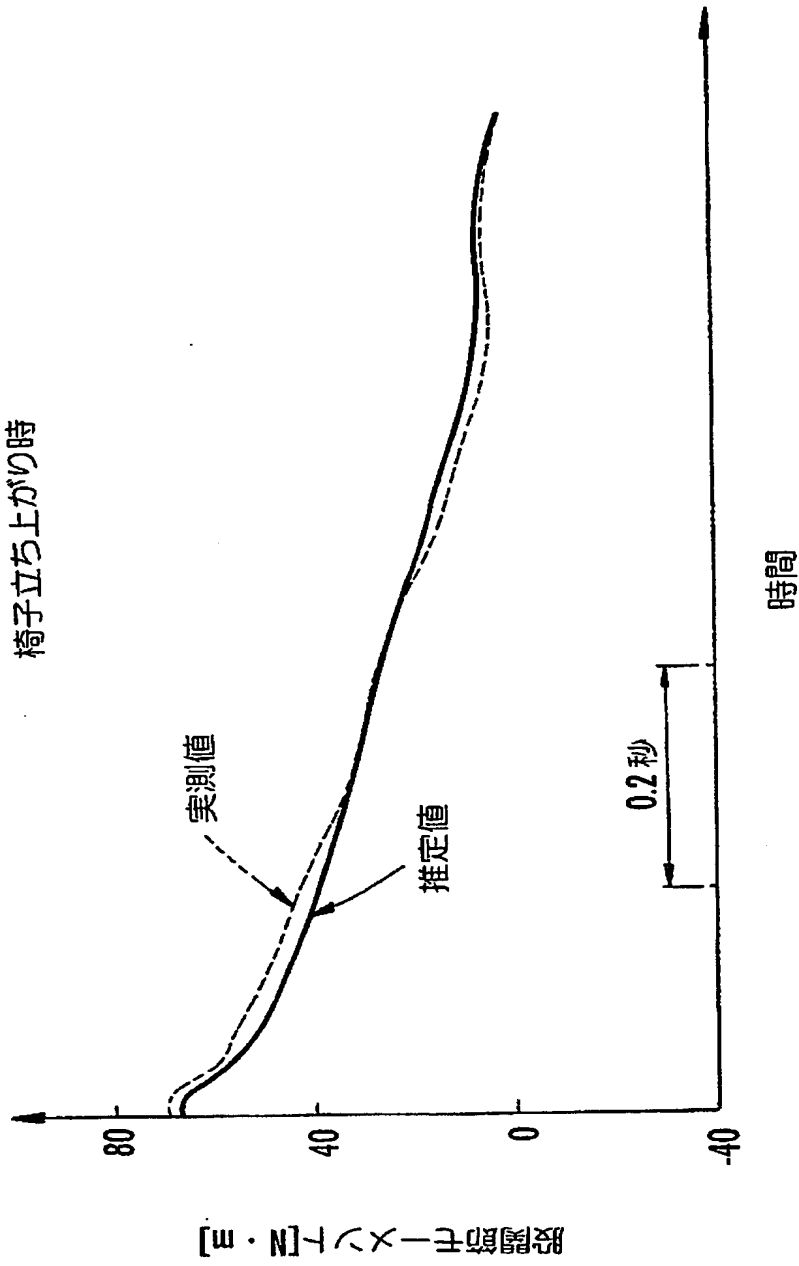
椅子立ち上がり時



【図 20】

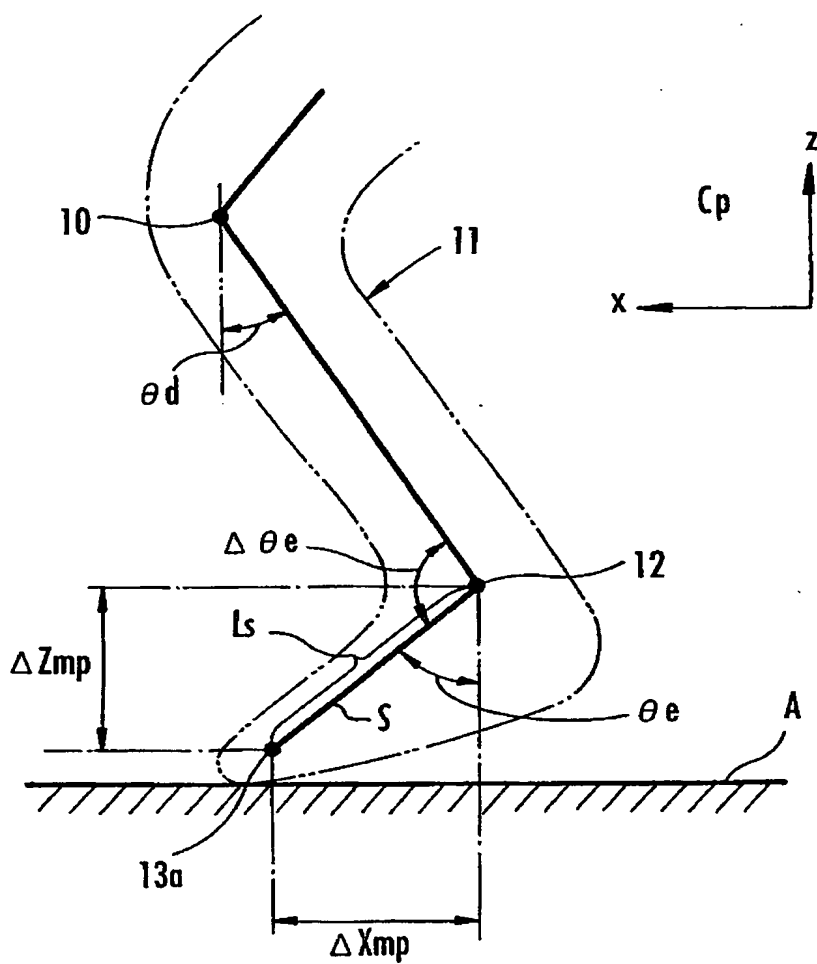
FIG. 20

椅子立ち上がり時



【図 21】

FIG. 21



**【書類名】 要約書****【要約】**

**【課題】** 複数種類の相関データを用いることなく、人間等の二足歩行移動体に係る床反力作用点の位置を比較的簡単な手法でリアルタイムに把握する。

**【解決手段】** 二足歩行移動体の平地歩行等の運動中に、二足歩行移動体の重心G0の位置と各脚体2の足首関節12の位置と足平部13の中足趾節関節13aの位置とを逐次把握する。足平部13の中足趾節関節13aの直下の箇所と足首関節12の直下の箇所とでそれぞれ足平部13の底面に設けた接地センサ51f, 51rにより検知されるそれぞれの箇所の接地の有無の組合わせに応じて重心G0、足首関節12および中足趾節関節13aのいずれかの水平方向位置を床反力作用点の水平方向位置として推定する。床反力作用点の鉛直方向位置は、足首関節12から接地面までの鉛直方向距離に基づき推定する。

**【選択図】** 図6

特願 2 0 0 3 - 1 1 3 0 6 0

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[ 0 0 0 0 0 5 3 2 6 ]

1. 変更年月日

1 9 9 0 年 9 月 6 日

[変更理由]

新規登録

住 所

東京都港区南青山二丁目 1 番 1 号

氏 名

本田技研工業株式会社